



Universidad
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS
CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS

PROYECTO FIN DE CARRERA

MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO FRENTE A IMPACTO EN VIGAS DE SECCIÓN CAJÓN DE FIBRA DE CARBONO

Ingeniería Industrial

Autor: Israel Cantuta Peralta

Tutor: Shirley K. García Castillo

Dpto: Mecánica de medios continuos

Leganés, marzo de 2011

**Título: MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO FRENTE
A IMPACTO EN VIGAS DE SECCIÓN CAJÓN DE FIBRA DE CARBONO**

Autor: Israel Cantuta Peralta

Director: Shirley K. García Castillo

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a los profesores Shirley K. García y Enrique Barbero por todo el tiempo, dedicación y esfuerzo que dedicaron de cara a la realización de este proyecto fin de carrera.

También agradezco a todo el departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras por los medios y conocimientos prestados, muy especialmente al profesor Carlos Santiuste, por su inestimable colaboración.

Y por último y no por ello menos importante, agradezco de corazón a todos mis familiares y amigos que me apoyaron de forma incondicional durante todo el tiempo que duró este viaje, tan importante como enriquecedor, que marca un antes y un después en mi vida.

A todos ellos, muchas gracias

Resumen

Palabras clave: viga de material compuesto de pared delgada, comportamiento dinámico a flexión, modelo numérico, criterio de Hashin, software Abaqus Explicit, resultados numéricos y experimentales.

En este trabajo se analiza el comportamiento dinámico a flexión de vigas de pared delgada y de sección cajón, desarrollando un modelo numérico 3D de elementos finitos. Se usará el criterio de rotura de Hashin, implementado en el software Abaqus Explicit para elementos tipo placa de material compuesto. Se compararán los resultados del modelo numérico con los experimentales relativos a valores fuerza empleada, energía absorbida y máxima deflexión de la viga.

Abstract

Keywords: thin-walled beam, dynamic flexural behaviour, numerical model, Hashin criterion, Abaqus Explicit, numerical and experimental results.

The dynamic flexural behaviour of thin-walled composite beams was analyzed by developing a 3D finite element model. The Hashin failure criterion was used, which were implemented in Abaqus Explicit software, for composites shell elements. The comparison between numerical and experimental results in terms of contact force, absorbed energy and maximum deflection displacement were realized.

Índice general

1. Introducción	13
1.1. Motivación	13
1.2. Objetivos	16
1.3. Esquema	16
2. Materiales Compuestos	18
2.1. Generalidades	18
2.2. Materiales compuestos de fibra de carbono	21
2.2.1. Fibra de carbón	21
2.2.2. Resina epoxi	26
2.3. Elementos tubulares de material compuesto	31
2.3.1. Aplicaciones	33
2.3.2. Procesos de fabricación	39
2.3.2.1. Enrollamiento de filamento	39
2.3.2.2. Pultrusión	42
2.3.2.3. Trenzado	43
2.3.2.4. Moldeo por bolsa de vacío	44
2.3.3. Comportamiento dinámico. Parámetros de diseño de elementos tubulares	46
2.4. Criterio de rotura de Hashin	51
2.4.1. Criterio de Hashin-Rotem (1973)	52
2.4.2. Criterio de Hashin (1980)	54
2.5. Ventajas del uso de modelo numérico	57
3. Modelo Numérico	58
3.1. Materiales	58
3.2. Modelos de impacto	61
3.2.1. Modelización geométrica	61
3.2.2. Interacciones	67
3.2.3. Condiciones iniciales	70
3.2.4. Condiciones de contorno	71
3.2.5. Mallado	78
4. Validación y Resultados	86
4.1. Validación	86
4.2. Resultados	87
4.2.1. Influencia de la velocidad de simulación	87
4.2.2. Influencia del espesor de la viga	90
4.2.3. Influencia del tamaño de la sección de la viga	91
4.2.4. Modos de fallo de Hashin	93
5. Conclusiones	98
5.1 Simulaciones de impacto	98
5.2 Trabajos futuros	99
6. Referencias	100

Índice de ecuaciones

Ecuación 2. 1: Hashin 1973_fallo de fibra a tracción.....	52
Ecuación 2. 10: Hashin 2D_fallo de fibra a tracción.....	55
Ecuación 2. 11: Hashin 2D_fallo de fibra a compresión	55
Ecuación 2. 12: Hashin 2D_fallo de matriz a tracción	55
Ecuación 2. 13: Hashin 2D_fallo de matriz a compresión	55
Ecuación 2. 2: Hashin 1973_fallo de fibra a compresión.....	53
Ecuación 2. 3: Hashin 1973_fallo de matriz a tracción	53
Ecuación 2. 4: Hashin 1973_fallo de matriz a compresión	53
Ecuación 2. 5: Expresión característica del criterio de Hashin.....	53
Ecuación 2. 6: Hashin 1980_fallo de fibra a tracción.....	54
Ecuación 2. 7: Hashin 1980_fallo de fibra a compresión	54
Ecuación 2. 8: Hashin 1980_fallo de fibra a tracción.....	54
Ecuación 2. 9: Hashin 1980_fallo de fibra a compresión.....	55
Ecuación 3. 1: Densidad.....	58
Ecuación 4. 1: Ecuación de energía de impacto	88

Índice de figuras

Fig. 1: Materiales compuestos en construcción y automovilismo	14
Fig. 10: Fibras de carbono provenientes de precursor PAN [3]	25
Fig. 100: Expresiones del criterio de Hashin 1973.....	94
Fig. 101: Criterio de rotura por compresión de matriz	94
Fig. 102: Deformación progresiva en modelo numérico y caso real	95
Fig. 103: Criterio de rotura por compresión de fibra.....	95
Fig. 104: Criterio de rotura por tracción de fibra	96
Fig. 105: Criterio de rotura por tracción de matriz.....	96
Fig. 106: Detalle de puntos de grandes tensiones, bajo el modo de fallo de compresión de matriz	97
Fig. 11: Tejidos de fibra de carbono de diferentes tamaños de mecha [3]	25
Fig. 12: Roving de carbono [3]	26
Fig. 13: Resinas de epoxi difuncionales y tetrafuncionales y un agente de curado diamina [3].....	27
Fig. 14: Reacción de curado de resina epoxi con amina [3]	28
Fig. 15: Estructura de una molécula TGMDA [3].....	29
Fig. 16: Estructura des epoxi bisfenol A [3]	30
Fig. 17: Reacción de la resina epoxi [3].....	30
Fig. 18: Perfiles de tubos de material compuesto [5]	32
Fig. 19: Comparación entre parachoques metálico y equivalente de material compuesto [8].....	33
Fig. 2: Industria naval deportiva	14
Fig. 20: Parachoques de vehículos	34
Fig. 21: Parachoques de trenes. Versión tradicional (Izq.), versión materiales compuestos (Drch).....	34
Fig. 22: Guarda raíles de carreteras.....	35
Fig. 23: Estructura de un vehículo con materiales compuestos [5]	36
Fig. 24: Tuberías de material compuesto [17].....	37
Fig. 25: Materiales compuestos usados en obra civil [16].....	38
Fig. 26: Bobinado helicoidal [3]	41
Fig. 27: Bobinado polar [3].....	41
Fig. 28: Bobinado circunferencial [3]	42
Fig. 29: Proceso de pultrusión.....	43
Fig. 3: Industria aeronáutica.....	15
Fig. 30: Trenzado y algunas aplicaciones	44
Fig. 31: Técnica de fabricación mediante bolsa de vacío	45
Fig. 32: Diagrama esquemático de la secuencia de fabricación de una viga de impacto de sección circular [5]	45
Fig. 33: Fallo progresivo de rasgado en el modelo de elementos finitos comparado con el ensayo experimental. a) Separación de pared superior en modelo MEF, b) Pared inferior sin separación en MEF, c) Separación pared superior en experimento. D) Separación pared inferior en experimento.....	47
Fig. 34: Curva de energía resistente para un tubo de pared delgada, con fractura inicial de 76.2mm [4]	47
Fig. 35: Resultados en tubos con gran sección comparados con los tubos estándar. 1) Tubo estándar, 2) Tubo de laterales delgados, 3) Tubo de paredes delgadas, 4) Tubo de doble tamaño, a) Perfil de sección transversal, b) Propagación de fractura, c) Fuerza- desplazamiento, d) Fuerza de muelle [4].....	48
Fig. 36: Resultados en tubos de pequeña sección transversal comparado con el tubo estándar. 1) Tubo estándar, 2) Tubo de lados superior-inferior delgado, 3) Tubo de lados laterales delgados. a) Sección de perfil, b) Relación de propagación de fractura, c) Fuerza-desplazamiento, d) Fuerza de muelle [4].....	49
Fig. 37: Comparación entre los resultados de la prueba estática y el análisis de elementos finitos. A) Sección circular, b) Sección cuadrada, c) Sección cuadrada reforzada mediante cartelas (rib), d) Sección tipo H.....	50
Fig. 38: Influencia de la temperatura en impactos dinámicos	50

Fig. 39: Zonas reforzadas en un parachoques de SMC [11]	51
Fig. 4: Industria militar	15
Fig. 40: Probeta rela ensayada	59
Fig. 41: Tejido fatetán	60
Fig. 42: Propiedades de matriz epoxi [9]	60
Fig. 43: Percutor de torre de caída	61
Fig. 44: Modelo de percutor entero de torre de caída	61
Fig. 45: Modelo de medio percutor de torre de caída	62
Fig. 46: Modelo de un cuarto de percutor de torre de caída	62
Fig. 47: Apoyo real de torre de caída	63
Fig. 48: Modelo de apoyo entero	63
Fig. 49: Modelo de apoyo	64
Fig. 5: Componentes de materiales compuestos [3]	19
Fig. 50: Modelo de apoyo	64
Fig. 51: Probeta real ensayada	65
Fig. 52: Modelo de probeta entera	65
Fig. 53: Modelo de media probeta	66
Fig. 54: Modelo de un cuarto de probeta	66
Fig. 55: Contacto definido entre apoyos y viga	67
Fig. 56: Contacto definido entre percutor y viga	68
Fig. 57: Contacto definido entre apoyo y viga	68
Fig. 58: Contacto definido entre percutor y viga	69
Fig. 59: Contacto definido entre apoyo y viga	69
Fig. 6: Componentes de material compuesto [2]	21
Fig. 60: Contacto definido entre percutor y viga	70
Fig. 61: Asignación de velocidad inicial a la masa del percutor	70
Fig. 62: Asignación de velocidad inicial a masa de medio percutor	71
Fig. 63: Asignación de velocidad inicial a masa de un cuarto de percutor	71
Fig. 64: Fijación del apoyo derecho	72
Fig. 65: Fijación del apoyo izquierdo	72
Fig. 66: Asignación de velocidad a toda la masa del percutor	72
Fig. 67: Fijación de apoyo	73
Fig. 68: Restricción debida a la simetría aplicada a la mitad de la viga	74
Fig. 69: Restricción debida a la simetría aplicada a la mitad del percutor	74
Fig. 7: Tejido híbrido de carbono y aramida [3]	22
Fig. 70: Restricción debida a la simetría aplicada a los apoyos	75
Fig. 71: Restricción debida a la simetría aplicada a la anchura de la viga	75
Fig. 72: Restricción debida a la simetría aplicada al percutor	76
Fig. 73: Restricción debida a la simetría aplicada a la mitad del percutor	76
Fig. 74: Restricción debida a la simetría aplicada a la mitad de la viga	77
Fig. 75: Restricción del empotramiento del apoyo	77
Fig. 76: Mallado de percutor	78
Fig. 77: Mallado de medio percutor	78
Fig. 78: Mallado de un cuarto de percutor	79
Fig. 79: Mallado inicial de la probeta	80
Fig. 8: Fabricación de fibra de carbono	23
Fig. 80: Mallado último de probeta	80
Fig. 81: Mallado inicial de viga con una simetría	81
Fig. 82: Mallado último de viga con simetría	81
Fig. 83: Mallado inicial de viga con doble simetría	82
Fig. 84: Mallado último de viga con doble simetría	82
Fig. 85: Mallado de modelo entero	82
Fig. 86: Ejemplo de método seguido para obtención de resultados en Abaqus	84
Fig. 87: Evolución del desplazamiento de centro de viga respecto a diferentes modelos mallados	84
Fig. 88: Modelo elegido para analizar	85
Fig. 89: Representación comparativa entre resultados de Abaqus y resultados experimentales, con línea de tendencia	86
Fig. 9: Fibras de carbono provenientes de precursor de alquitrán [3]	24
Fig. 90: Representación de Fuerza-tiempo de simulaciones de velocidad variable	87
Fig. 91: Representación de Fuerza máxima- Energía de impacto	88
Fig. 92: Representación Fuerza-Tiempo de un ensayo de torre de caída con ruido	89
Fig. 93: Detalle de zona superior de viga y nodos tomados seleccionados para medir el desplazamiento vertical	89
Fig. 94: Evolución del desplazamiento vertical de nodos superiores e inferiores comparado con el caso teorico de resistencia de materiales	90
Fig. 95: Representacion de Fuerza-tiempo con superposición de gráfica experimental de $v=3.5\text{m/s}$	90
Fig. 96: Representación de Fuerza máxima-espesor de viga	91
Fig. 97: Representación de Fuerza-tiempo de simulaciones de vigas de lado variable y velocidad 2.55m/s	92
Fig. 98: Representación de Fuerza-tiempo de simulaciones de vigas de lado variable y velocidad 3.5m/s	92

Fig. 99: Representación de Fuerza máx-Energía de impacto, con vigas de diferente longitud de lado..... 93

Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades de diferentes fibras de carbono provenientes de PAN	23
Tabla 2: Propiedades de las resinas epoxi más utilizadas [3].....	30
Tabla 3: Influencia de la sección [5]	49
Tabla 4: Propiedades fibra de carbono [9]	59
Tabla 5: Relación entre número de elementos y modelos numéricos.....	79
Tabla 6: Tabla resumen de tiempos de simulación de los tres modelos	83
Tabla 7: Número de nodos en función de desplazamiento de centro de viga.....	85
Tabla 8: Velocidades y energías de impacto	88

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La utilización de elementos estructurales fabricados con materiales compuestos ha tenido un crecimiento constante durante las últimas décadas, siendo las industrias aeronáutica-aeroespacial, automovilística y militar las que mayores aplicaciones le dan debido a:

- La importancia en la reducción de peso de las estructuras en vuelo en el primer caso
- Estructuras con buena resistencia específica, en el segundo caso
- Combinación de las anteriores y obtención de materiales tecnológicamente superiores al de otras naciones, en el tercer caso.

Los materiales compuestos se caracterizan por su ligereza, su alta resistencia y su elevado coste. Mientras que en la industria automovilística, el coste del ahorro de un kilogramo de masa se estima en 1 euro, en la industria aeronáutica son 100 euros y en la industria aeroespacial son 10000 euros [3].

Por otro lado y debido al creciente interés por el cuidado medioambiental, todas las industrias concienciadas buscan estructuras cada vez más livianas con el fin de reducir su consumo energético sin disminuir las prestaciones estructurales. El empleo de materiales compuestos, por tanto, se ha extendido a otros campos de la ingeniería como la naval, construcción, etc. debido a su elevada resistencia y rigidez específica, y a un excelente comportamiento frente a fatiga y corrosión [12].

Los materiales compuestos más habituales son los laminados, formados por apilamiento de varias láminas de matriz polimérica reforzadas con fibras de alta resistencia como es el caso de las fibras de carbono, vidrio, aramida o boro, entre otras.

Las fibras de carbono, en particular las que tienen matriz polimérica, se han convertido en el material compuesto avanzado más utilizado en la industria aeroespacial y automovilística. Esto se debe a su elevada resistencia a la tensión, un módulo de elasticidad alto y baja densidad.

Dentro de este tipo de material compuesto, destacan los que tienen estructura sándwich, que se componen de un núcleo de material ligero situado entre dos láminas de material resistente y rígido, denominadas pieles. La finalidad del núcleo es separar las dos pieles para conseguir que el momento de inercia aumente y así disponer de un comportamiento mejor a flexión sin un aumento de peso significativo [23]

Para realizar el diseño de un componente mediante un laminado es necesario conocer su comportamiento ante diferentes tipos de carga a las que pueda verse sometido durante su vida en servicio. Los materiales compuestos de este tipo presentan, en general, un buen comportamiento ante esfuerzos en su plano de flexión, ya sean estáticos o de fatiga. En cambio, uno de sus aspectos menos favorables es su peor comportamiento ante impactos perpendiculares a su plano; estos impactos suelen generar delaminaciones, pérdidas de continuidad entre dos láminas, y otros tipos de daños. Las propiedades del material cuando ha sufrido este daño debido a un impacto dinámico disminuyen de una manera apreciable pudiendo no cumplir los requisitos de diseño.

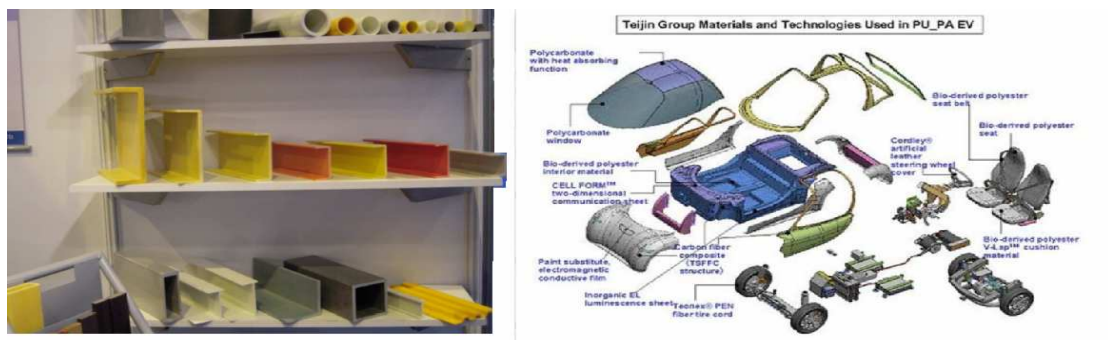


Fig. 1: Materiales compuestos en construcción y automovilismo [18]



Fig. 2: Industria naval deportiva [19]



Fig. 3: Industria aeronáutica [20]



Fig. 4: Industria militar [21]

Para realizar el diseño de un componente de material compuesto de un modo seguro no es suficiente conocer el comportamiento ante cargas estáticas, también es necesario conocer su comportamiento ante cargas dinámicas. Para esto se realizan los ensayos de impacto de alta velocidad y de baja velocidad en el laboratorio.

La información que se obtiene de un ensayo es limitada. Hay datos importantes del comportamiento del material que son difíciles de conseguir y cuya obtención puede llegar a ser demasiado costosa.

Debido a que los elementos de sección tubular de material compuesto están siendo cada vez mas utilizados en muchos sectores de la industria, por ejemplo, en forma de vigas biapoyadas (parachoques de vehículos, guarda railes), vigas en mensula (palas de generadores eólicos), y que su comportamiento bajo flexión dinámica no esta tan estudiado como su comportamiento bajo tracción [4], este proyecto va a realizar la simulación de una viga de material compuesto, formado por fibras de carbono y matriz epoxi, de sección cuadrada sometida a impactos de baja velocidad, con el fin de simular su comportamiento utilizando para ello un software comercial, que aplica el Método de los Elementos Finitos para llevar a cabo el análisis. Los resultados obtenidos, serán comparados con los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

1.2. Objetivos

El objetivo del presente proyecto es evaluar la aplicabilidad del algoritmo de Hashin que se encuentra ya implementado en el código comercial de cálculo por elementos finitos “ABAQUS”, para obtener resultados satisfactorios en la simulación de elementos tubulares de material compuesto. La versión de “ABAQUS” seleccionada es la versión 6.7, debido a que es la primera versión de “ABAQUS” que lo incorpora y de ahí que haya sido la elegida para la realización de este proyecto.

Para tal fin, se van a simular casos en régimen dinámico de baja velocidad, en los que se modelizará una viga biapoyada con elementos tipo Shell, sobre la que golpea un percutor de cabeza cilíndrica. Se busca modelizar un ensayo de baja velocidad, realizada en torre de caída.

1.3. Esquema

Este proyecto se divide en cinco capítulos, siendo el de introducción el primero de ellos.

En el segundo capítulo se hace una introducción a los materiales compuestos en general y los de fibra de carbono en particular, así como los procesos de fabricación, parámetros de diseño, comportamiento frente a impacto, criterio de rotura, ventajas e inconvenientes de su uso.

El tercer capítulo está dedicado a la modelización del impacto de baja velocidad. Se modeliza la viga de material compuesto en sus dos versiones: modelización de viga entera y modelización de viga con simetrías. Además se incluye el análisis de sensibilidad de malla llevada a cabo para elegir el modelo final para someterlo a distintos casos de simulación en Abaqus.

El cuarto capítulo se dedica a la validación y resultados obtenidos con el modelo numérico y su comparación con los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio.

En el quinto capítulo se exponen las conclusiones fundamentales y se proponen posibles líneas de desarrollo para trabajos futuros.

Por último se incluye un último capítulo, sexto capítulo, en el que se expone toda la bibliografía consultada para la realización del proyecto.

Capítulo 2

Materiales Compuestos

2.1. Generalidades

Se entiende por material compuesto aquel formado por dos, o más, materiales distintos que presenta algunas propiedades físicas determinadas superiores a la de los materiales que lo constituyen [1].

Hay que hacer algunas consideraciones para ‘ajustar’ el término material compuesto a nuestro objeto de estudio:

- Material fabricado por el hombre.
- No existe reacción química entre los componentes.
- Material macroscópicamente heterogéneo.
- Material avanzado.

No se consideran como materiales compuestos, aquellos materiales naturales como la madera (fibras enrolladas de celulosa + lignina), huesos (colágeno mas cristales inorgánicos + agua + grasas), músculos.

Del mismo modo, no se consideran materiales compuestos, materiales tradicionales o macroscópicamente isótropos como el hormigón armado, las aleaciones metálicas, o el adobe.

Las razones más destacadas por las que se recurre al uso de los materiales compuestos son:

- Por su alta resistencia.
- Por su bajo peso.
- Por su flexibilidad
- Por su estabilidad dimensional
- Por su alta resistencia dieléctrica
- Por su capacidad de consolidación de partes
- Por su resistencia a la corrosión
- Por su variedad de acabados

Por otro lado, los materiales compuestos pueden presentar limitación en comparación a otro tipo de materiales, tales como:

- Existe la creencia de que no son duraderos
- No existe una tradición de diseño con estos materiales

- Las herramientas de cálculo no son tan conocidas ni están ampliamente extendidas como para los metales
- Falta información sobre su comportamiento
- El coste de la materia prima y procesos de fabricación son elevados
- En algunos casos, existen peligros para la salud en los procesos de fabricación
- El peligro de fuego puede ser mayor en ciertos materiales
- Los mecanismos de daño son más complejos



Fig. 5: Componentes de materiales compuestos [3]

Un material compuesto presenta dos elementos principales: fibra y matriz. La combinación adecuada de estos componentes origina unos materiales con mejores propiedades que las partes que los componen por separado. Además de fibra y matriz existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares para cada tipo de fabricación y aplicación.

Atendiendo a la tipología de las matrices de los materiales compuestos, estos pueden dividirse en tres categorías:

- Matriz polimérica (PMCs)
 - Polímeros Termoeestables (poliéster, epoxi, fenólicas,...)
 - Polímeros Termoplásticos (polipropileno, poliamida,...)
- Matriz metálica (MMCs)
 - Aleaciones de aluminio
 - Aleaciones de titanio
 - Aleaciones de cobre
- Matriz cerámica (CMCs)
 - Alúmina
 - Carburo de silicio

- Nitruro de silicio

De todos ellos, los más ampliamente utilizados son los de la primera categoría.

La fibra es el componente de refuerzo del material compuesto. Aporta resistencia mecánica, rigidez y dureza y va a ser determinante para obtener las principales propiedades mecánicas. Las características más sobresalientes de las fibras de los materiales compuestos son su resistencia a la tracción específica y su elevado módulo específico.

Tipos de refuerzo:

- El refuerzo por partículas, en el que se dan las siguientes características:
 - El aumento de propiedades es modesto
 - El comportamiento mecánico suele ser isótropo
 - Son los materiales menos costosos y de más fácil fabricación de todos los materiales compuestos
- El refuerzo por fibras, en el que se usan fibras pueden presentarse como:
 - Fibras cortas, o continuas
 - Roving
 - Complejos
 - Hilos cortados
 - Fibra de molienda
- Fibras cortas
 - La sección transversal puede ser circular, cuadrada o hexagonal
 - Diámetros: 2.5 micras- 0.1 mm
 - Esbeltez: aprox 100
- Whiskers
 - Fibras cortas monocristalinos, virtualmente sin defectos
 - Whisker de acero: resistencia mecánica 20 GPa
 - Presentan un grave riesgo para la salud si se inhalan
- Tejidos
 - Son una solución de compromiso ante el problema de los whiskers
 - No se consiguen propiedades elevadas
 - Se pueden alcanzar mayores grados de compactación que con partículas o whiskers
 - Como son aproximadamente bidimensionales presentan igual resistencia en su plano
 - Tipos:
 - Telas o tafetanes (Plain Weave). Los hilos de trama y urdimbre se entrecruzan alternativamente.
 - Satén (Crowfoot satin). Los hilos de urdimbre y de trama están entrecruzados según un orden y una frecuencia programados afín de obtener un aspecto unido, no estando los puntos de ligadura dispuestos en orden.
 - Sarga (Twill). Los hilos de urdimbre y trama están entrecruzados según un orden y una frecuencia programados a fin de obtener líneas diagonales características de este tipo de tejido.
 - Otros

FIBRAS	Fibras Cerámicas (Carburo de Silicio, Alúmina)
	Fibras Metálicas
	Fibras Inorgánicas (Carbono, Vidrio, Boro)
	Fibras Orgánicas (Aramida, Polietileno)
MATRICES	Matrices Inorgánicas (Cemento, Geopolímeros, Yeso)
	Matrices Termoestables (Epoxi, Viniléster, Poliéster, Fenólica, Esteres cianato, Bismaleimidas, Poliimidas, Polieteramida)
	Matrices Termoplásticas (ABS, Polipropileno, Policarbonato, Acetato, PBT, Polieterimida, PET, Nylon, Poliamida, PEEK, PEKK, PAI, PAS)
NÚCLEOS	Nidos de Abeja (Aluminio, Nomex, Polipropileno)
	Espumas (Poliuretano, Poliestireno, PVC)
	Sándwich Tejido 3D , Madera de Balsa
ADHESIVOS	Epoxi, Poliuretano, Acrílicos
RECUBRIMIENTOS	Cerámicos, Fenólicos, Epoxi+Arena, Intumescentes, Mats

Fig. 6: Componentes de material compuesto [2]

2.2. Materiales compuestos de fibra de carbono

2.2.1. Fibra de carbón

Las fibras de carbono fueron utilizadas por Edison en el siglo XIX como filamento para bombillas. La investigación que dio como resultado el uso de las fibras de carbono en los materiales compuestos modernos se atribuye a los trabajos de principios de los años sesenta de Shindo en Japón, Watt en Inglaterra y Bacon y Singer en los Estados Unidos. Aunque se ha estudiado una gran cantidad de materiales como precursores de la fibra de carbono, el poliacrilonitrilo (PAN), una mesofase del alquitrán y la celulosa (en orden decreciente de su uso), son los tres precursores que actualmente se utilizan para fabricar las fibras de carbono. Las fibras que están basadas en el PAN tienen diámetros que oscilan entre las 5 y 7 μm y aquellas cuyo precursor es el alquitrán están entre las 10 y 12 μm .

El poliacrilonitrilo es el precursor más común utilizado actualmente para obtener fibras de carbono y generalmente no es PAN al 100 %. Normalmente, es un copolímero que contiene metil acrilato, metil metacrilato, vinil acetato, ácido itacónico, o cloruro de vinilo. El PAN (o su copolímero) es hilado utilizando la técnica de hilado húmedo (la técnica de hilado fundido se ha desarrollado también para el hilado del PAN).

La fibra de carbono es un material excepcional para aplicaciones de estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga ya que es el único material conocido cuyas propiedades mecánicas apenas son sensibles a la aplicación de una carga cíclica. También en lo que se refiere a su comportamiento en condiciones estáticas, sus propiedades son muy elevadas tanto en las fibras de bajo módulo como en las de alta resistencia.

Su densidad es baja (1600 kg/m³), lo cual implica que sus propiedades mecánicas específicas o por unidad de peso sean excepcionalmente elevadas.

Su coste, más elevado que el de las fibras de vidrio está bajando drásticamente, debido al aumento de la demanda, al ser aplicado en numerosos sectores productivos además de aeroespacial: deporte, transporte terrestre, marina, etc. Su incorporación junto con fibras de vidrio o aramida (materiales híbridos) presenta unas grandes expectativas, al presentar las tres fibras propiedades complementarias.

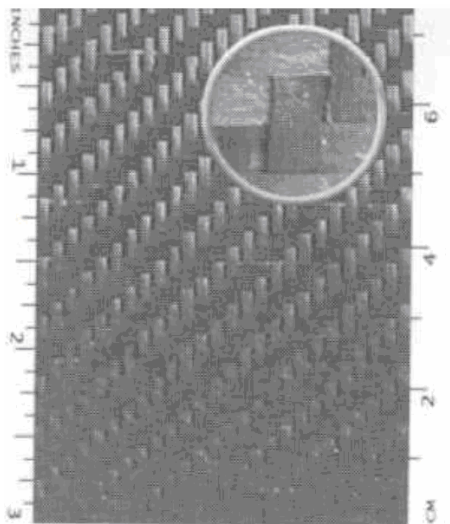


Fig. 7: Tejido híbrido de carbono y aramida [3]

Tipos de fibras de carbono

A partir de las temperaturas del tratamiento de calentamiento, se han identificado tres tipos de diferentes fibras de carbono:

La fibra de carbono de alto módulo (HM) es la más rígida y requiere la mayor temperatura en el tratamiento.

La fibra de carbono de alta resistencia (HR) es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia tensil.

El último tipo de fibra de carbono (III) es la más barata; la rigidez es menor que en las anteriores pero la asistencia es buena. Este tipo tiene la temperatura más baja en el tratamiento.

Propiedades de la fibra de carbono

Se distingue por sus características específicas elevadas. Las fibras HM tienen un módulo específico 70 veces superior al de las aleaciones de aluminio.

Designación	Alta resistencia (HR)	Alto módulo (HM)	III
Diámetro de hilo (μm)	8	7	7.-8
Densidad (Kg/m^3)	1740-1760	1810-1870	1820
Módulo de elasticidad (Gpa)	230	390	290

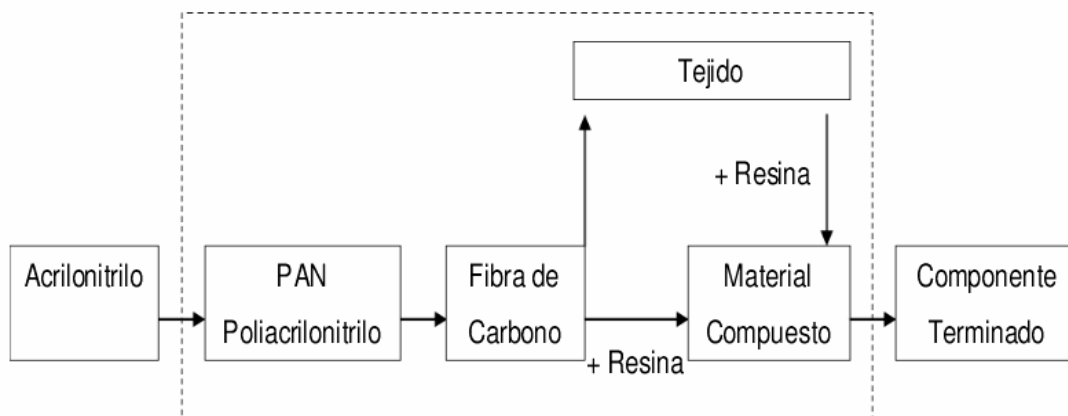
Resistencia a tracción (Gpa)	2,6-5	2,1-2,7	3,1
Elongación a la rotura (%)	2	0,7	1,1
Módulo específico	130	210	160
Coeficiente de expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	2,56	2,56	2,56

Tabla 1: Propiedades de diferentes fibras de carbono provenientes de PANⁱ

- No presenta plasticidad, el límite de rotura coincide con el límite elástico.
- Tienen los inconvenientes del coste, la baja resistencia al impacto de baja energía y las diferencias de potencial que engendran al contacto con los metales, que pueden favorecer corrosiones de tipo galvánico.

Fabricación de la fibra de carbono

Las fibras de carbono se fabrican mediante pirólisis controlada y ciclización de precursores de cierta fibra orgánica, el más común de los cuales es el precursor poliacrilonitrílico (PAN) y el alquitrán; el primero es una fibra sintética y el segundo se obtiene de la destilación destructiva del carbón. Existe otro precursor de fibra de carbono que se deriva de materiales provenientes de la celulosa, el rayón.



Aranjuez, Julio 07

Fig. 8: Fabricación de fibra de carbono

Precursores de Rayón, como se ha comentado se derivan de materiales provenientes de la celulosa. Actualmente apenas se utilizan, debido a que en el proceso de fabricación, al llegar a la carbonización, se pierde un 75% de la masa de fibra y resulta un proceso mucho más caro que el resto.

Precursores del alquitrán, basados en MPP, en brea o en cloruro de polivinilo (PVC). Las fibras de carbono que derivan de estos precursores son relativamente más baratas ya que tienen una transformación más efectiva que los anteriores precursores.

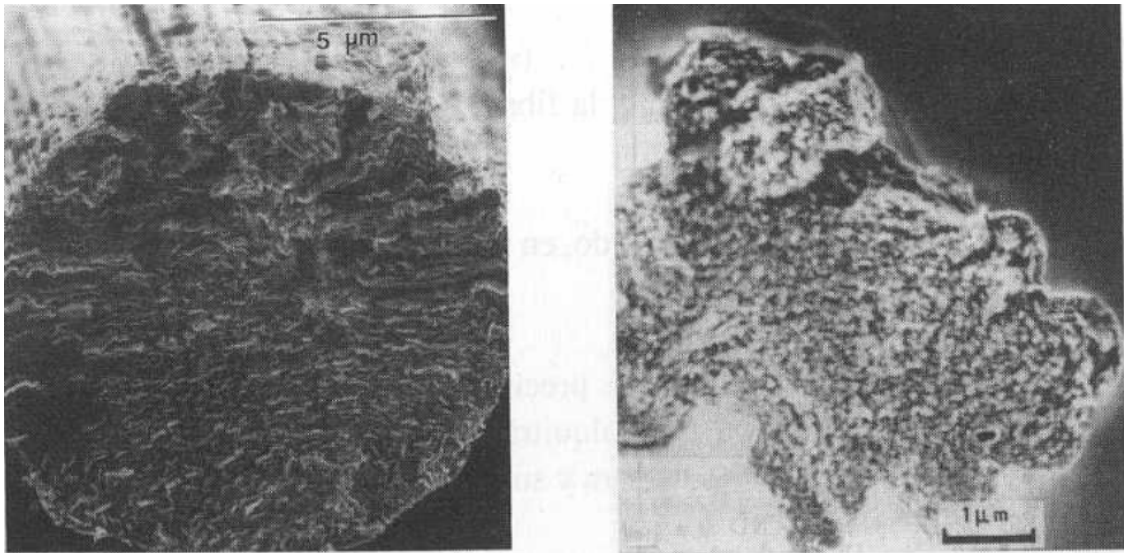


Fig. 9: Fibras de carbono provenientes de precursor de alquitrán [3]

Precursores PAN, ya se ha dicho que son la base para la mayoría de las fibras de carbono comerciales en la actualidad. La conversión en fibra de carbono al final del proceso de transformación, está entre el 50 y el 55%.

Cada tipo de precursor tiene su técnica de procesado pero en general todos siguen una misma secuencia, tomando como base un proceso de fabricación cuyo precursor es el PAN, se pueden distinguir las siguientes etapas: estabilización, carbonización, grafitización y tratamiento de superficie.

- a) **Estabilización.** En el primer paso de la fabricación de la fibra de PAN (estabilización), un filamento de copolímero de poliacrilonitrilo (PAN) es estirado y pasado a través de un horno de oxidación a baja temperatura para adquirir estabilidad dimensional. Este paso suele denominarse infusible.
- b) **Carbonización.** En el siguiente paso de carbonización la estructura interna del polímero se convierte a una temperatura más alta (800°C bajo una atmósfera inerte) en lazos de anillos hexagonales de carbono continuo. Durante el período de calentamiento, muchos elementos diferentes del carbono desaparecen y los cristales de carbono se orientan a lo largo de toda la longitud de la misma.
- c) **Grafitización.** En el siguiente tratamiento de calentamiento a más altas temperaturas por encima de 2000°C (grafitización), el tamaño de los cristales de carbono aumenta y mejora la orientación de los cristales de la fibra.
- d) **Tratamiento de superficie.** Finalmente, la fibra pasa a través de una cámara de tratamiento de superficie para promover la adhesión de la fibra.

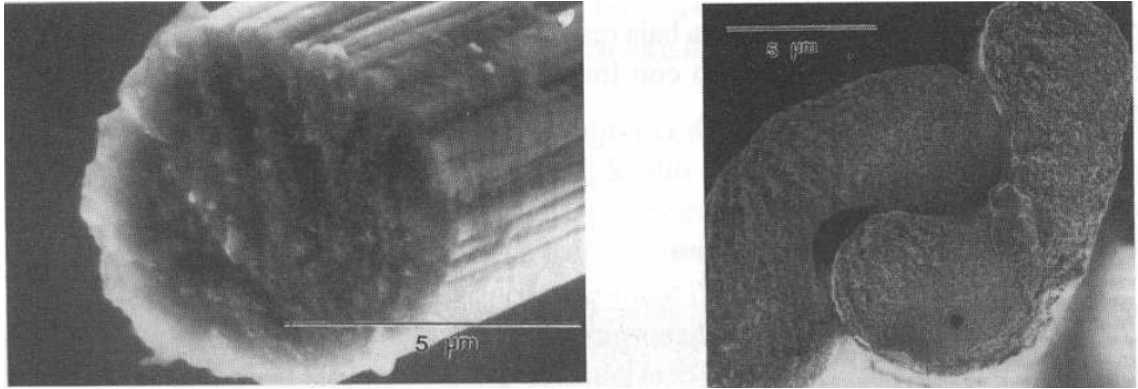


Fig. 10: Fibras de carbono provenientes de precursor PAN [3]

Otros pasos serían el acabado y el empaquetado, en función de la presentación industrial, para facilitar el manejo de la fibra.

Los pasos de procesamiento para la fibra de precursor de alquitrán son similares, salvo en el paso inicial, en el que la fibra se derrite a partir de alquitrán procesado isótropo o anisótropo. El tamaño y orientación de los cristales, la porosidad de la fibra y su impureza son los principales factores que afectan a las propiedades físicas finales del filamento.

Los filamentos de fibra de carbono tiene un diámetro típico que oscila entre 5 y 8 µm y están combinados en mechas que contiene 5000 y 12000 filamentos. Estas mechas pueden retorcerse en hilos y formar tejidos parecidos a los de la fibra de vidrio. También se encuentran en el mercado tejidos híbridos conteniendo fibras de vidrio y carbono.

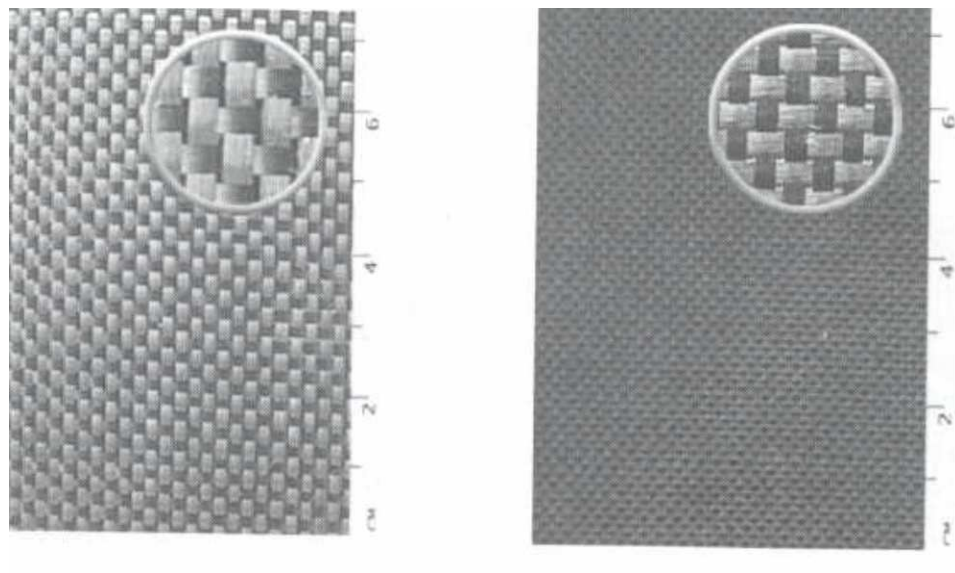


Fig. 11: Tejidos de fibra de carbono de diferentes tamaños de mecha [3]

Cuando el tratamiento de calentamiento para la fibra de carbono aumenta, el módulo de elasticidad crece exponencialmente a lo largo de todo el rango de temperatura; el motivo para esto es que la cristalinidad de la fibra aumenta hasta un valor máximo hacia los 1600°C y entonces cae hasta un valor constante, mientras la temperatura sube hasta el valor más alto utilizado.

Presentaciones industriales de la fibra de carbono

Son disponibles en diversas presentaciones

Mechas (500-100.000 filamentos) y **Roving**

Tejidos, (unidireccionales o multidireccionales)

Tejidos híbridos, (vidrio-carbono, aramida-carbono)

Preimpregnados con resinas epoxi

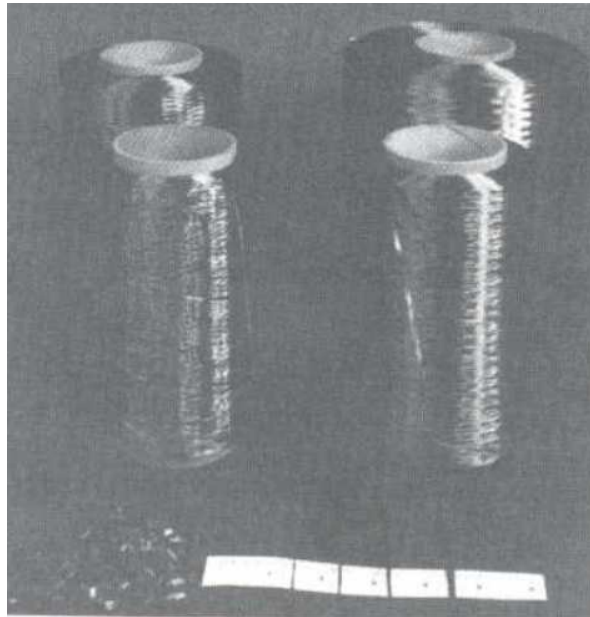


Fig. 12: Roving de carbono [3]

Condiciones de almacenamiento

Las fibras de carbono son poco resistentes al roce y al impacto de baja energía, y en función de su presentación, a la temperatura. Es recomendable tener mucha precaución en su manejo.

En el caso de un preimpregnado deberá guardarse en una cámara frigorífica, de forma que sus propiedades no se alteren por un aumento de temperatura. Para los tejidos e hilos es válido lo señalado previamente para las condiciones de almacenamiento de la fibra de vidrio.

2.2.2. Resina epoxi

La química de las resinas epoxi está basada en la capacidad del radical epóxido (figura 13), para reaccionar con un amplio rango de otros radicales orgánicos y efectuar enlaces cruzados sin la aparición de un producto condensado. Las resinas son difuncionales o polifuncionales, en términos del grupo epóxido, y pueden estar basadas en estructuras alifáticas o estructuras aromáticas en forma de columna vertebral. De hecho, la mayoría de las resinas utilizadas para procesos de laminación son aromáticas

pero algunas veces mezclada con materiales alifáticos. Las resinas basadas en materiales alifáticos son frecuentemente la base de los adhesivos o los sistemas de recubrimiento, donde su flexibilidad mejorada es ventajosa. En general las resinas aromáticas dan superiores prestaciones en los materiales compuestos. La resina se cura por reacción con un agente de curado y la reacción a menudo se controla mediante el uso de catalizadores y aceleradores. Los sistemas de resinas comerciales son a menudo una mezcla compleja de resinas, agentes de curado, catalizadores/ aceleradores, modificadores termoplásticos, y otros aditivos. De este modo estas resinas pueden ser adaptadas para reunir los requerimientos, a menudo conflictivos, de altas prestaciones y facilidad de proceso.

Las fórmulas estructurales de dos de las más comunes resinas base se muestran en la figura 13. Estas resinas son todas altamente aromáticas con diferentes grados de funcionalidad de epoxi. Los agentes de curado son normalmente anhídridos difuncionales o aminas, un ejemplo de los cuales se muestra también en la figura 13.

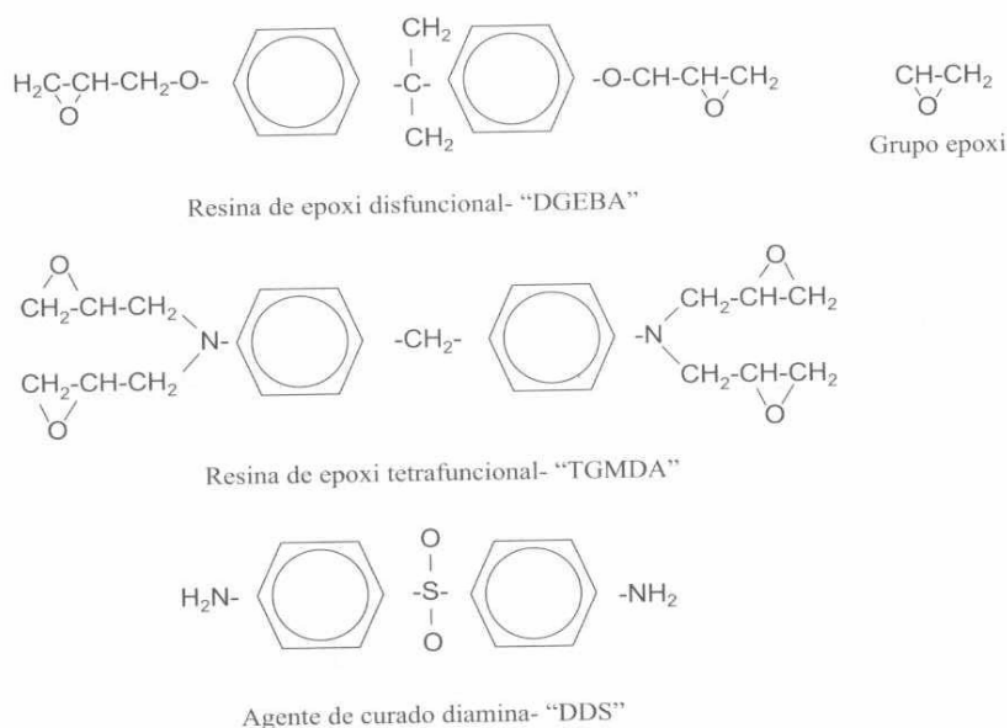


Fig. 13: Resinas de epoxi difuncionales y tetrafuncionales y un agente de curado diamina [3]

En la figura 14, se muestra un esquema de la reacción de curado para una resina de diglicidil éter o bisfenol A (DGEBA) con una diamina. El principal desafío en la formulación de resinas epoxi es equilibrar sus prestaciones a elevadas temperaturas, especialmente la resistencia a tracción (en caliente o húmedo) del material compuesto, con su dureza y tolerancia al daño medida mediante una compresión después del ensayo de impacto. Al mismo tiempo, se debe mantener una adecuada procesabilidad del material. Los sistemas basados en la reacción del tetraglicidil (TGMDA) con diamino difenil sulfafo, dan lugar a una resina curada a una elevada Tg (temperatura de transición vítrea) pero una inaceptable fragilidad. Los sistemas actuales de altas prestaciones pueden estar basados en similares ingredientes principales pero con adición de termoplásticos funcionalizados (polisulfatos, poliéster sulfatos, o poliimidas) y otros aditivos. Esto da

lugar a la formación de complejas estructuras dobles en la resina curada formadas por dominios interpenetrantes de fases ricas en termoestables y fases ricas en termoplásticos. Utilizando esta tecnología, se puede obtener un equilibrio muy favorable entre la resistencia a tracción, la tolerancia al daño después de un ensayo de impacto y la procesabilidad del material.

Las resinas epoxi son termoendurecibles que contienen en su molécula dos o varias funciones epoxídicas o glicídicas. La resina epoxi más típica es el diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA).

La dureza de los epoxis es superior a la de las resinas de poliéster y, por ello, pueden operar a temperaturas más altas. Tiene buena adherencia a muchos sustratos, baja contracción durante la polimerización y son especialmente resistentes a los ataques de álcali. Esto permite modelos de alta calidad, con buena tolerancia dimensional, para ser fabricado.

Las resinas epoxi se caracterizan por tener una baja retracción, un buen comportamiento a temperatura elevada, hasta 180°C y una buena resistencia a los agentes químicos.

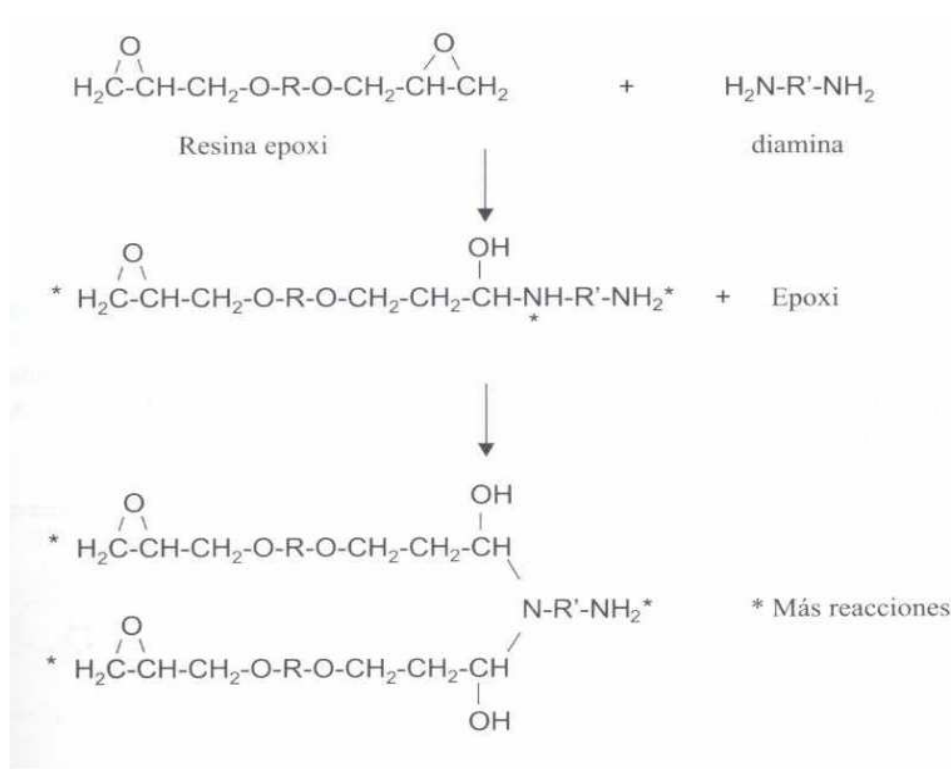


Fig. 14: Reacción de curado de resina epoxi con amina [3]

Clasificación de las resinas epoxi

La mayoría de resinas epoxi están basadas en tres estructuras químicas: **TGMDA** (dianilina tetraglicidil metileno), **DGEBA** (diglicidil éter de bisfenol A), y fenolformaldehído epoxi novolaca. La principal diferencia entre las moléculas es que TGMDA y las novolacas curan a una densidad de entrecruzamiento mayor que la epoxi

Bisfenol A, la cual presenta altos valores de módulo de Young y temperatura de transición vítrea (T_g) pero bajos valores de deformación a la rotura.

TGMDA. Esta molécula constituye el componente más importante de las formulaciones de resinas epoxi para aplicaciones de alta tecnología.

La alta densidad de entrecruzamiento da a esta resina un alto valor de módulo de Young y una alta temperatura de servicio. Se ha demostrado que la resistencia de compresión de los laminados carbono/ epoxi es proporcional al módulo de Young de la matriz.

Existen algunos inconvenientes a la alta densidad de entrecruzamiento de las resinas TGMDA. La principal objeción es que la deformación a rotura es baja, apenas 1.5% lo cual lleva a delaminaciones antes del impacto y baja resistencia a compresión después del impacto. Esta molécula presenta una gran absorción de agua, hasta un 6% del peso de la resina, esto puede provocar una reducción de T_g en más de 55°C.

Empresas suministradoras de TGMDA: Ciba Geigy, lo comercializa con el nombre de Araldite MY 720

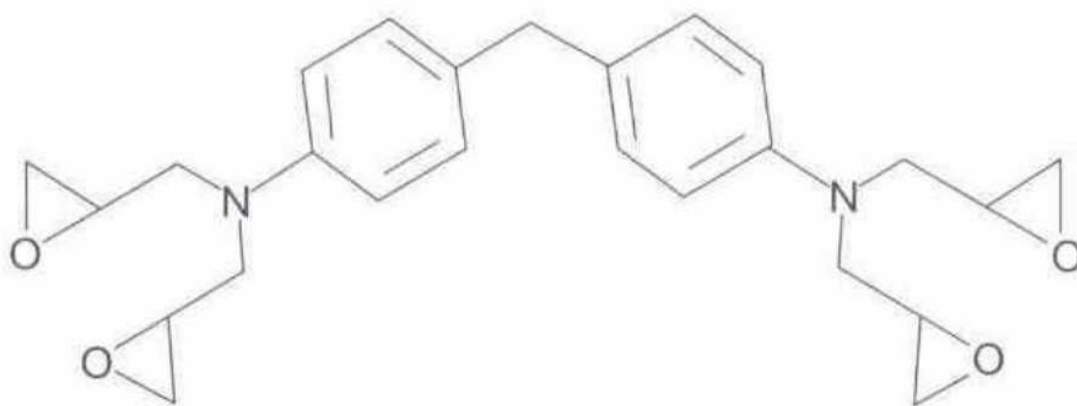


Fig. 15: Estructura de una molécula TGMDA [3]

DGEBA. Epoxi basada en Bisfenol A, es la resina más utilizada actualmente. Esta resina es elaborada por reacción de bisfenol A con epiclorohidrina.

Empresas suministradoras de DGEBA: Dow Chemical, Shell Chemical y Ciba Geigy.

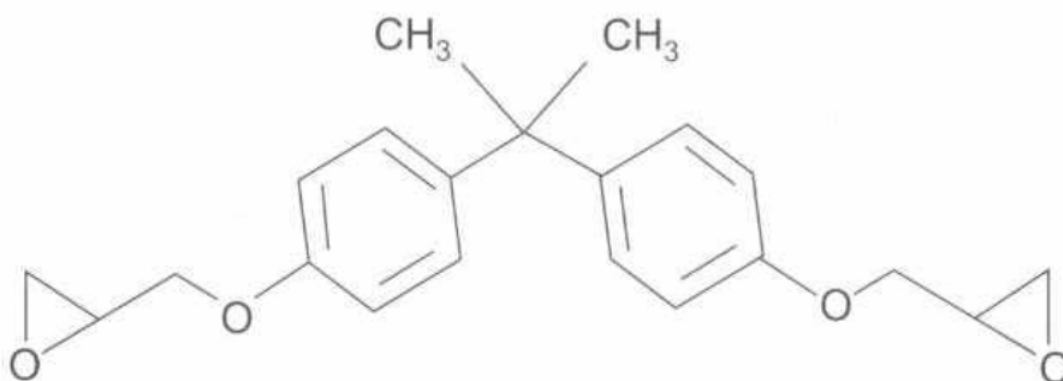


Fig. 16: Estructura des epoxi bisfenol A [3]

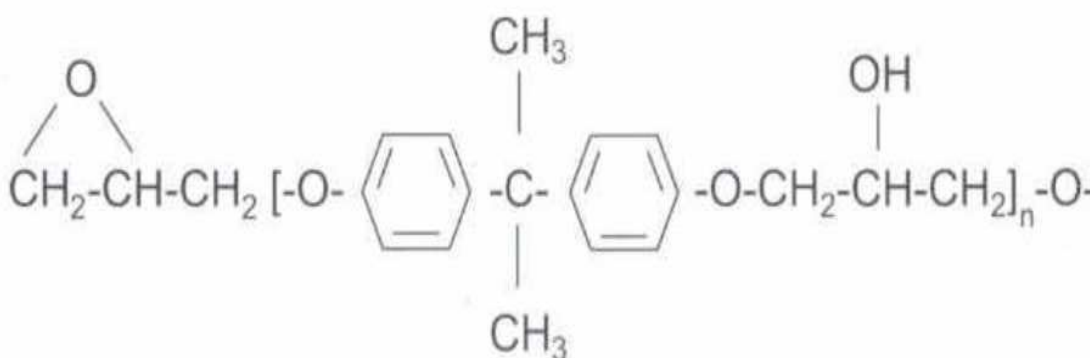


Fig. 17: Reacción de la resina epoxi [3]

La resina epoxi Bisfenol A cura a menor densidad de entrecruzamiento que la tetrafuncional, esto implica que el módulo y la T_g de la resina bifuncional (Bisfenol A) son más bajos, además las propiedades mecánicas también se ven reducidas. Sin embargo, el curado de la resina epoxi Bisfenol A tiene una mayor deformación a rotura y también menor absorción de agua.

	TGMDA	Bisfenol A
Módulo de Young (MPa)	3800-4500	2750-3450
Deformación a rotura (%)	1.-2	5.-8
T_g (°C)	178-235	120-175
Absorción de agua (%)	4.-6	2.-3

Tabla 2: Propiedades de las resinas epoxi más utilizadas [3]

Otros epoxis. En la industria de los materiales compuestos se usan otros tipos de resinas epoxi además de la epoxi Bisfenol A y la TGMDA tetrafuncional.

- Las resinas epoxis **alifáticas** representan un papel principal en resinas para RTM, para enrollamiento en húmedo, y para laminados. Estas son usadas como diluyentes porque curan junto con la resina y poseen una viscosidad muy baja.

Agentes de curado

Para el caso de las resinas epoxi la elección del agente de curado es muy importante. Con las resinas de poliéster y viniléster el catalizador de curado altera el tiempo de curado, pero no afecta sustancialmente a la viscosidad de la resina o a las propiedades finales del polímero. Con fenólicas, ésteres o cianoatos el número de agentes de curado adecuados es bastante limitado, así que normalmente se usa un sistema formulado completamente. Para las resinas epoxi, en contraste, existe una amplia posibilidad de elección de agente de curado adecuado, ya que éstos determinan las propiedades térmicas y mecánicas últimas de la resina.

Los agentes de curado son de tres tipos básicamente: aminas, anhídridos y catalíticos. Las aminas además pueden ser divididas en alifáticas, cicloalifáticas y aromáticas.

2.3. Elementos tubulares de material compuesto

La proliferación del uso de materiales compuestos de sección tubular en un amplio abanico de sectores industriales, se debe entre otras causas al abaratamiento en los procesos de fabricación (factores de escala), similares prestaciones que sus equivalentes fabricados de metal aunque más ligeros, y de comportamiento más constantes bajo ambientes extremos como bajas temperaturas y ambientes corrosivos [5].

Todo lo anterior esta desequilibrando la balanza a favor del uso de materiales compuestos, aunque uno de sus inconvenientes sea que no son materiales con una larga tradición de uso como los materiales metálicos, lo cual hace necesario que se tengan que estudiar todas las posibles configuraciones que pueden adoptar para la fabricación de las vigas de material compuesto, lo cual es tan amplio como métodos de fabricación se dispone en la actualidad.

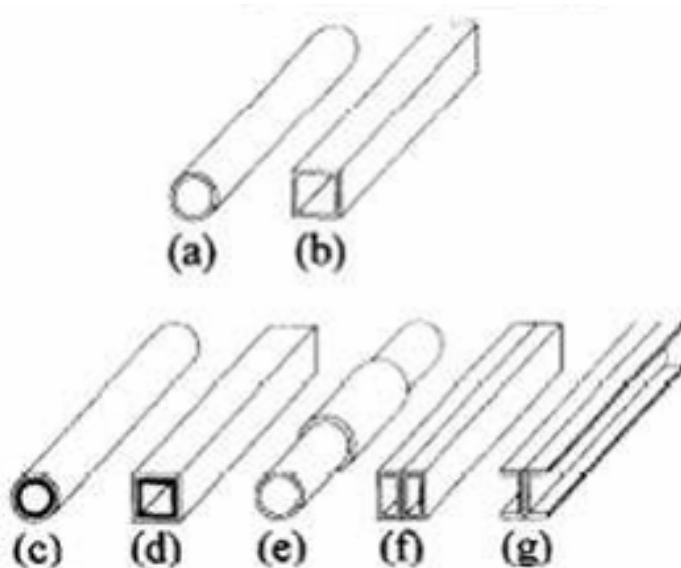


Fig. 18: Perfiles de tubos de material compuesto [5]

Los excelentes valores de resistencia y rigidez específicas, junto con la flexibilidad en el diseño a la resistencia a la corrosión y una serie de ventajas, permiten la utilización de los materiales compuestos en elementos estructurales de altas prestaciones sustituyendo a materiales metálicos tradicionales. A estas características debe unirse también la elevada capacidad específica de absorción de energía de los materiales compuestos, que los convierte en una solución excelente en el diseño de elementos para la absorción de energía cinética en un choque [5]

La elevada capacidad específica de absorción de energía de los materiales compuestos de matriz orgánica durante un choque es consecuencia de los complejos modos de fallo que el material puede exhibir de forma simultánea [4]; mientras que por el contrario, los metales solamente absorben la energía asociada al choque mediante deformación plástica. En general, puede afirmarse que la utilización de materiales compuestos en la estructura de un vehículo permite obtener un comportamiento frente a choque que va a ser como mínimo equivalente al que se obtendría utilizando metales.

Debido a que el aplastamiento axial de tubos constituye, con independencia del material utilizado, la forma óptima de absorber energía en un choque, durante los últimos años el estudio de la absorción de energía en materiales compuestos se ha centrado fundamentalmente en el análisis del fallo axial de tubos, de cara a su utilización como elementos absorbentes de energía en un choque [8].



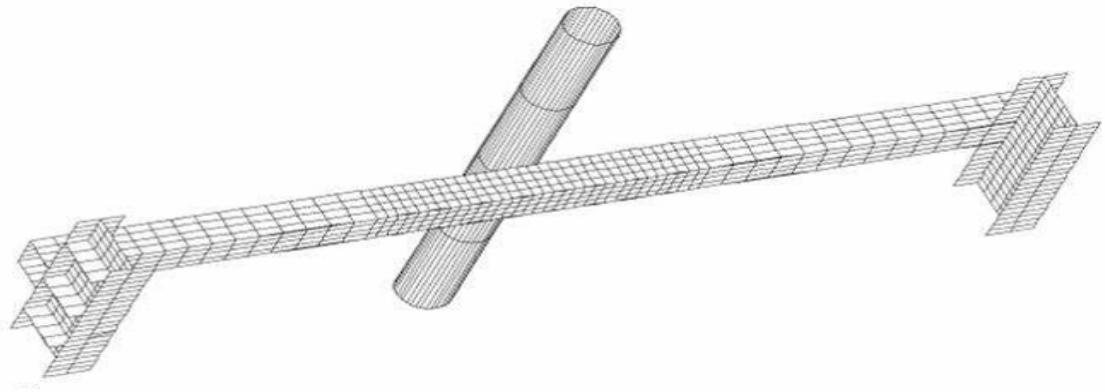


Fig. 19: Comparación entre parachoques metálico y equivalente de material compuesto [8]

2.3.1. Aplicaciones

- **Parachoques de coches**

El uso eficiente del combustible y la regulación de emisiones de gases de los coches de uso privado, son dos importantes temas que la industria está tratando hoy en día. La mejor manera de mejorar la eficiencia en el consumo de combustible sin sacrificar la seguridad, es mediante el empleo de materiales compuestos de fibra reforzada en la estructura de los vehículos, debido a que estos materiales tienen más resistencia específica que el acero y el aluminio [5].

La fabricación de parachoques para vehículos de pasajeros está siendo impulsada por la industria automovilística debido a que los materiales compuestos usados para estas aplicaciones, tienen una elevada capacidad de absorción de energía, lo cual es muy importante de cara a la seguridad de los pasajeros en caso de accidente.



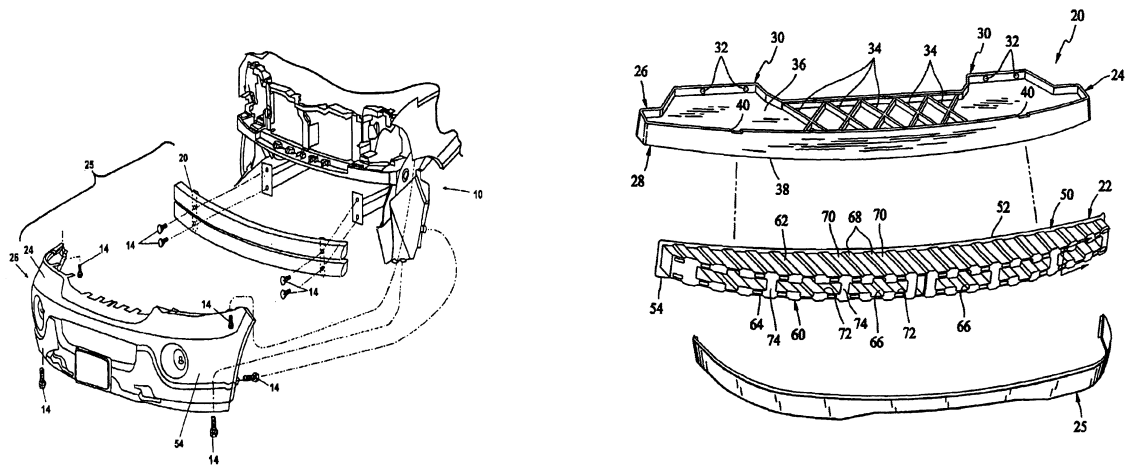


Fig. 20: Parachoques de vehículos

Del mismo modo, la industria ferroviaria está desarrollando nuevos diseños para la fabricación de parachoques y elementos estructurales, mediante el uso de los materiales compuestos. Los elementos tipo sándwich con fibra reforzada proporcionan un elevado potencial para satisfacer todos los requisitos referentes a máxima resistencia y rigidez así como absorción de energía durante una sollicitación de impacto o choque. A la vez que se satisfacen estos requerimientos mecánicos, las propiedades retardantes ante incendios son muy tenidas en cuenta por la industria ferroviaria, debido a que este medio de transporte traslada mucha gente en sus vagones. [15]

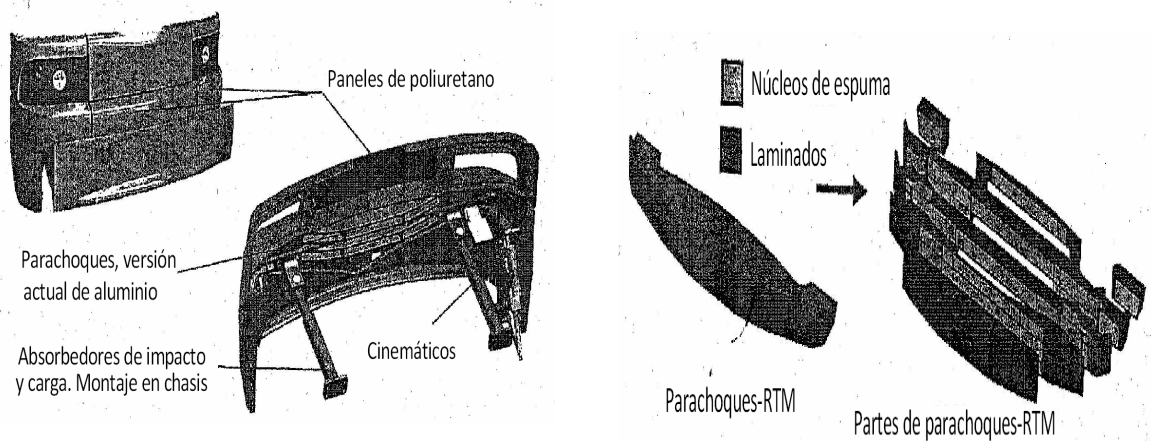


Fig. 21: Parachoques de trenes. Versión tradicional (Izq.), versión materiales compuestos (Drch)

- **Guarda raíles de carreteras**

Otra de las aplicaciones de los materiales compuestos son la fabricación de guarda raíles de para carreteras. Estos elementos, al igual que los parachoques, presentan una elevada capacidad de absorción de energía de impacto, lo cual los convierte en buenos sustitutos para los guarda raíles clásicos, que resultaban muy rígidos y peligrosos para los motociclistas.



Fig. 22: Guarda raíles de carreteras

- **Vigas de puertas laterales de vehículos automóviles**

Las vigas para puertas laterales de vehículos, están siendo estudiados ampliamente debido a que se está comprobando que la sustitución del acero por materiales compuestos, presenta ventajas tan importantes como [5]:

- Elevada resistencia específica
- Reducción de peso estructural
- Se consiguen vehículos más ligeros y por tanto, se reduce el consumo.
- Compromiso medioambiental

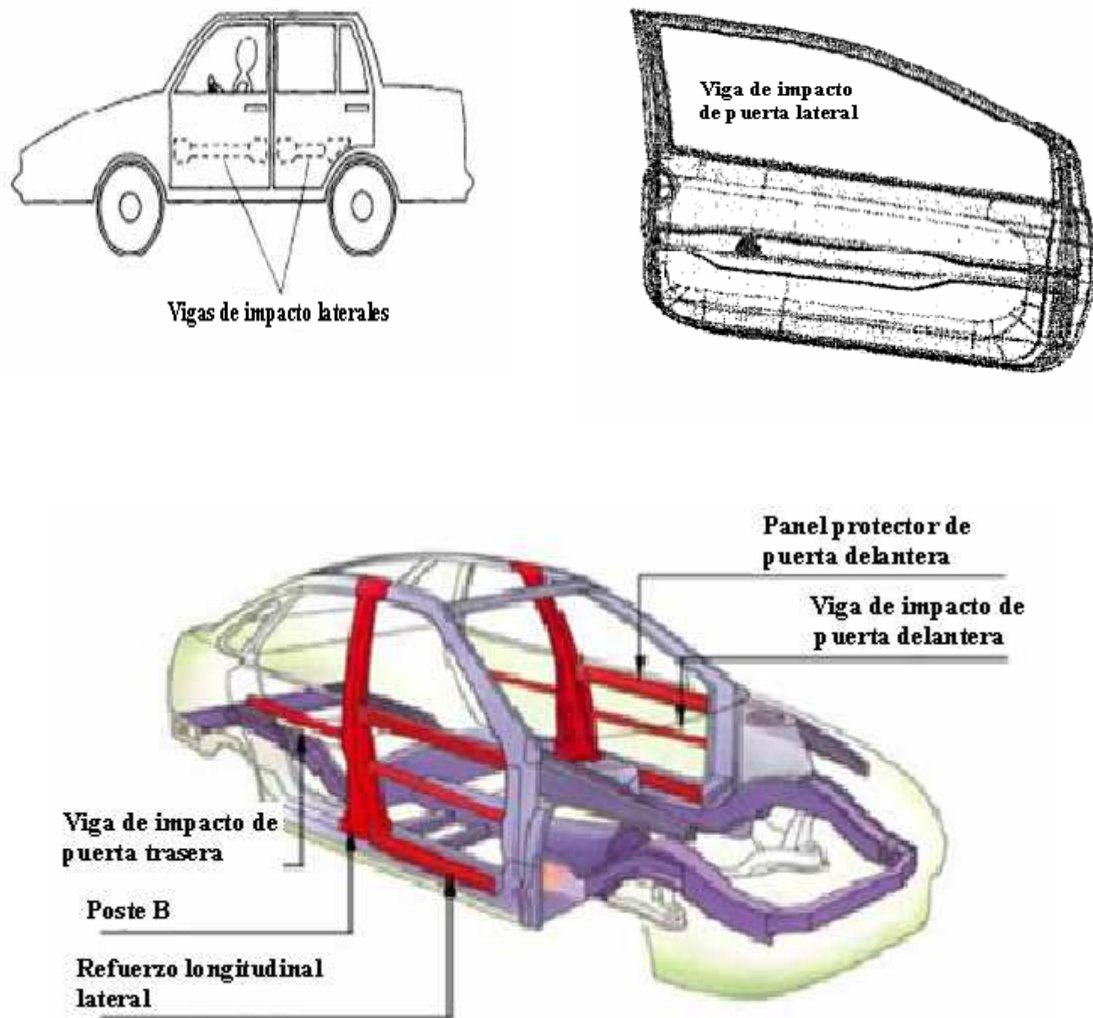


Fig. 23: Estructura de un vehículo con materiales compuestos [5]

• Conductos de gas o tuberías

Dentro de la industria del transporte, los materiales compuestos de sección tubular también pueden ser usados como tubos de transporte de líquidos, como en la industria petrolífera, al ser más ligeros, más resistentes (elevada relación resistencia/peso comparado con el acero) tanto a cargas estructurales como a condiciones ambientales como corrosión, temperatura o agentes químicos. Todo ello los convierte en un potencial sustituto de los actuales conductos de acero, los cuales presentan limitaciones ante ambientes corrosivos y químicos.

Habitualmente los materiales plásticos y compuestos son utilizados para líneas de distribución de gas natural a baja presión. Mientras estos materiales se han utilizados para líneas de flujo, de recolección y líneas de distribución, aun no se ha generalizado su uso en líneas de transmisión de gas natural a alta presión [17].

La posibilidad de controlar el tipo, cantidad y dirección de fibras de refuerzo, hace que estos materiales se conviertan en candidatos ideales para una amplia variedad de aplicaciones de presión regulable.

Los materiales compuestos de fibra de vidrio se han usado ampliamente en la industria petrolífera para el transporte de gas natural, durante mucho tiempo. Sin embargo, estos materiales no han sido utilizados para aplicaciones de transporte de gas natural en elevados volúmenes ni elevadas presiones.

Se necesita potenciar mas el campo de I+D en el área de la ciencia de los materiales compuestos para introducir estos materiales en aplicaciones en las que predomina el acero. [17]



Fig. 24: Tuberías de material compuesto [17]

• Refuerzo de pilares en obra civil

Esta es otra de las aplicaciones de los materiales compuestos. Las cualidades más importantes que ofrecen los materiales compuestos en este campo son su ligereza y resistencia específica, lo que permite que se puedan usar estos materiales para reforzar en poco tiempo, de forma barata y segura elementos estructurales tales como pilares y vigas.

Hay un interés creciente en estas estructuras, en particular en USA, pero hay cuestiones técnicas por resolver, como por ejemplo [16]:

1. Desarrollo de estándares y guías de diseño.
2. Diseño eficiente y caracterización de juntas panel-panel y fijación de las cubiertas en las vigas.
3. Comportamiento a fatiga de paneles y conexiones.
4. Durabilidad característica bajo cargas mecánicas y ambientales combinadas.
5. Mecanismos de fallo y tensión última, incluyendo modos de pandeo local y global.

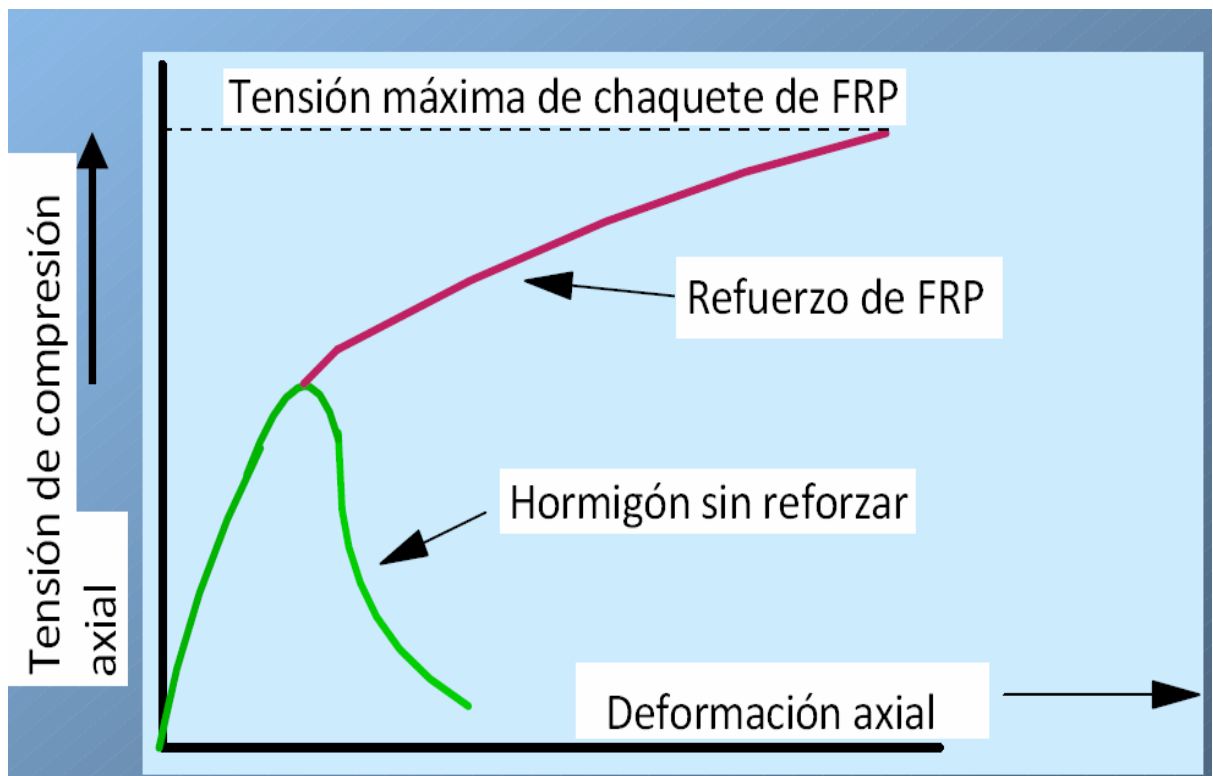
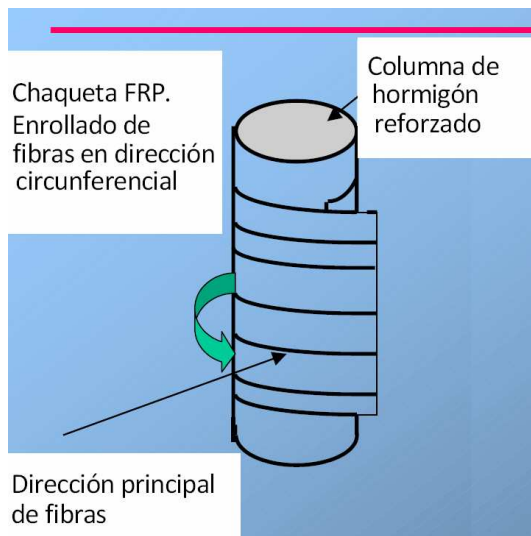


Fig. 25: Materiales compuestos usados en obra civil [16]

2.3.2. Procesos de fabricación

2.3.2.1. Enrollamiento de filamentos.

Este es un proceso de fabricación en el que refuerzos continuos en forma de roving, monofilamentos impregnados o bandas son enrolladas a grandes velocidades y de forma precisa sobre un mandril que rota entorno a su eje de giro

Las estructuras que pueden ser fabricadas mediante enrollamiento son necesariamente de revolución, con simetría cilíndrica, esférica, cónica o con formas geodésicas, aunque existen otras formas que pueden ser enrolladas siempre que no tengan zonas cóncavas con curvaturas entrantes en donde el refuerzo no podría ser posicionado mediante este proceso y sería necesario usar métodos alternativos para terminar estas zonas. El diámetro de estas estructuras, como longitud característica, puede variar de unos pocos milímetros, hasta varios metros.

Las variables de diseño que permite este proceso de fabricación son:

- Selección de material: este proceso permite el uso de un amplio abanico de fibras y matrices
- Ángulo de enrollados en torno al eje del mandril
- Tensión de enrollado del refuerzo
- Contenido de volumen en fibra del material fabricado
- Número de capas para alcanzar el espesor de diseño

Métodos industriales de fabricación

Hay dos métodos de fabricación por enrollamiento de filamento:

- Procedimiento vía húmeda
- Procedimiento vía seca

Procedimiento vía húmeda

En el procedimiento por vía húmeda, el bobinado se efectúa a partir de hilos o conjuntos de hilos en paralelo (roving) con un número de hilos determinado y una resina líquida, normalmente termoestable, que contiene los diferentes elementos necesarios para su curado. Hilos o roving son desenrollados, impregnados en resina líquida por paso a través de un recipiente de impregnación, sometidos a un escurrido que limita la cantidad de resina impregnada. Después de la impregnación y a través de una serie de órganos de guiado, los hilos son depositados sobre el mandril portador de una estructura bobinada.

Una vez terminado el bobinado, la estructura fabricada se deja a temperatura ambiente o se lleva a la estufa para favorecer el proceso de curado de la matriz termoestable.

Procedimiento vía seca

En este caso, el bobinado de las estructuras se realiza a partir de conjuntos, a menudo de poco número de hilos, preimpregnados, de resina de poliéster o epoxi; esta resina contiene todos los ingredientes necesarios para su endurecimiento. Durante la fabricación del preimpregnado, a fin de hacerlo fácilmente manipulable, la resina ha sido llevada a un estado de viscosidad elevada, sea por pre-congelación o sea por evaporación de un disolvente adicionado o preliminar.

De igual forma que en el procedimiento vía húmeda, las mechas son deslizadas por el exterior de las bobinas montadas sobre tubo-soporte, solicitadas y guiadas hasta el dispositivo que asegura la aplicación de la banda sobre el mandril. Cuando el bobinado está terminado, la estructura es sometida a polimerización, como en el caso del moldeo por vía húmeda, bien sea por medio de vacío-horno o autoclave.

El bobinado a partir de mechas preimpregnadas es más fácil que el bobinado por vía húmeda, por el hecho de la supresión del sistema de impregnación.

El sistema de guiado y tensado de las mechas es ligeramente distinto a los que se usan en el procedimiento vía húmeda. En este caso los órganos-guía y de tensado deben ser libres permitiendo su rotación y deben estar contruidos en un material lo mas anti-adherente posible.

Los sistemas de posicionamiento del refuerzo sobre el mandril son análogos a los comentados para procedimiento de vía húmeda.

Existen dos tipos de rovings preimpregnados. Los primeros están realizados directamente a partir de hilos base, impregnados de resina, juntados, tratados térmicamente y bobinados. Los segundos son obtenidos por impregnación en condiciones particulares del ovillo de roving entero. En general, la relación fibra/ resina se sitúa alrededor de 80/20

Existen tres técnicas fundamentales:

Bobinado helicoidal

En este modelo de bobinado, mientras el mandril gira continuamente, el sistema de alimentación de fibra avanza adelante y atrás a una velocidad controlada para generar el ángulo helicoidal deseado. Tras la primera pasada las bandas no están posicionadas de forma adyacente, y es necesario realizar un número de pasadas determinado hasta que las fibras comienzan a quedar unas junto a otras. El modelo de bobinado helicoidal se caracteriza por el cruce continuo de fibras en ciertos puntos del mandril. De esta forma una capa del espesor de la pieza está constituida por dos láminas con orientaciones balanceadas. La velocidad de rotación del mandril depende del ángulo de enrollado, de la anchura de la banda y de la longitud total del depósito.

La ventaja del bobinado helicoidal es la gran versatilidad del proceso. Casi cualquier combinación de diámetros y la longitud de pieza pueden ser enrollados mediante este método.

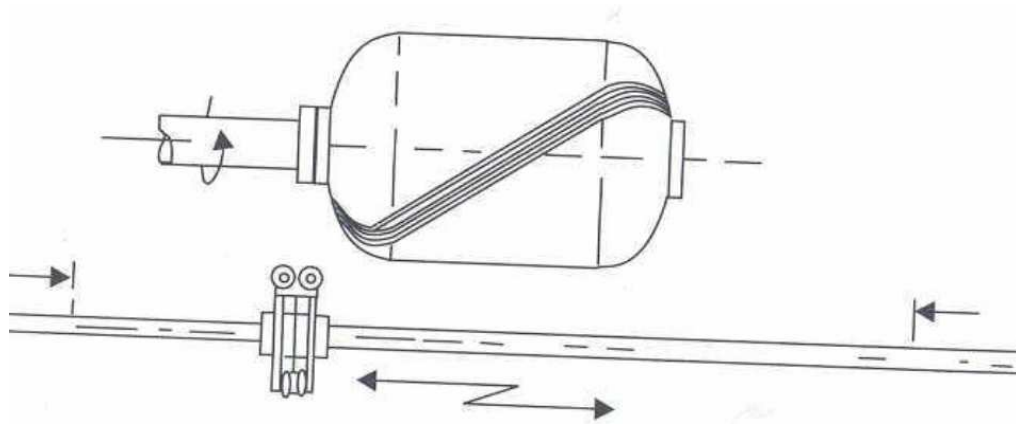


Fig. 26: Bobinado helicoidal [3]

Bobinado polar o plano

En este caso la fibra pasa tangencialmente a la apertura polar de uno de los extremos, cambia de dirección y pasa tangencialmente a la apertura del extremo contrario. Las fibras son provistas por un brazo giratorio que describe grandes círculos entorno al mandril que está inclinado un ángulo igual al de bobinado y que deposita las fibras sobre el mandril de forma plana. Debido a que el mandril está regulado para que gire justamente la anchura de banda, éstas son posicionadas por el brazo giratorio de forma adyacente [7].

La principal ventaja del bobinado polar es su simplicidad; no existe cambio de sentido del sistema de alimentación y la velocidad de bobinado puede mantenerse regular. La única restricción de este método es la relación longitud-diámetro de la pieza que debe ser menor que 1.8 [7]. Este método es ampliamente usado para el bobinado de estructuras esféricas.

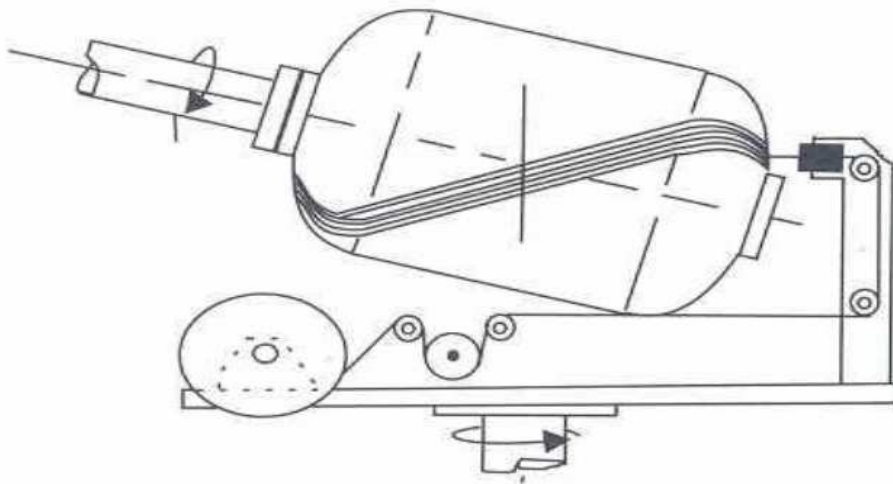


Fig. 27: Bobinado polar [3]

Bobinado circunferencial

El bobinado circunferencial es un tipo de bobinado helicoidal de gran ángulo (90°). Cada rotación completa del mandril hace que el sistema de alimentación de fibra avance una anchura de banda completa.

Los enrollados circunferenciales son usualmente combinados con bobinados longitudinales (helicoidales o polares) con objeto de obtener una estructura balanceada desde un punto de vista resistente. Los enrollados circunferenciales son aplicados a la zona cilíndrica de un depósito cerrado, mientras que los helicoidales o polares son aplicados tanto a la zona cilíndrica como a los fondos o cerramientos extremos del depósito.

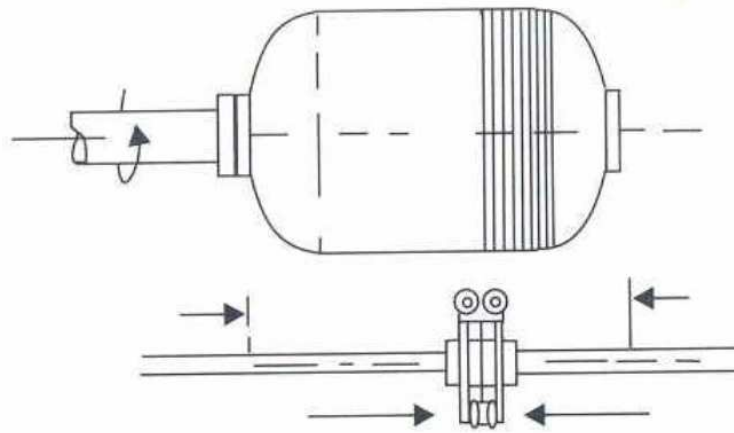


Fig. 28: Bobinado circunferencial [3]

2.3.2.2. Pultrusión

La pultrusión continua es un proceso usado para la fabricación de plásticos reforzados con fibras de sección transversal constantes, tales como formas estructurales, vigas, canales, y tubos. En este proceso se hace que las fibras de filamento (cordón) continuo se impregnen en un baño de resina y después se las estira a través de un troquel de acero caliente que determina la forma del producto acabado. Gracias a la concentración de fibras y a la orientación paralela a la longitud de la lámina que ha sido estirada se consiguen altas resistencias para este material.

Este es un proceso de bajo costo debido al paso directo de fibras continuas y resinas a una pieza terminada

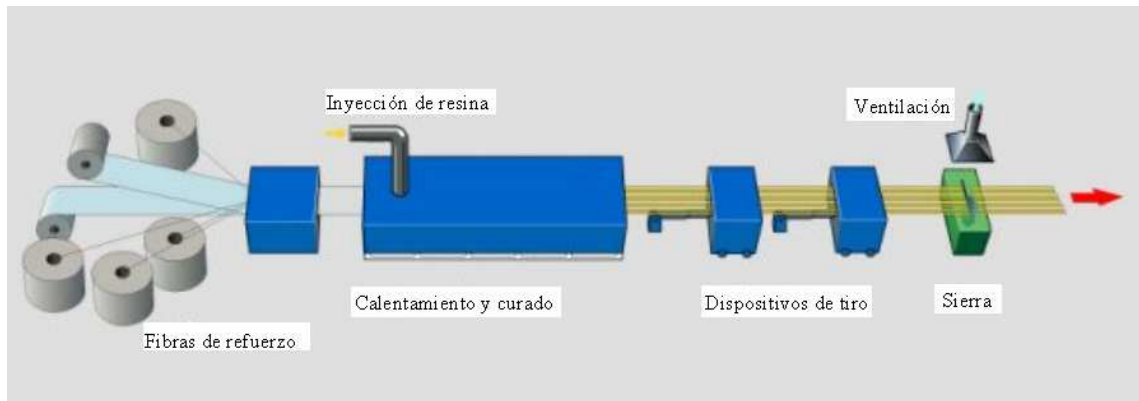


Fig. 29: Proceso de pultrusión

Las guías de preformado son las encargadas de dar la preforma y orientación a las fibras. La resina es inyectada en dirección transversal a la orientación de la pieza a fabricar.

Las fibras ingresan secas a la cámara de inyección donde son impregnadas por resina a presión. La sección transversal del molde es la que da forma definitiva a la pieza.

Mientras las fibras impregnadas atraviesan el molde ocurre el curado ayudado por la aplicación de temperatura mediante calentadores.

Durante el proceso de curado el compuesto se contrae y se separa de las paredes del molde, dejando el producto terminado. Este proceso se realiza a velocidad constante. De esta manera la producción puede tener virtualmente longitudes infinitas. Guillotinas móviles son las encargadas de cortar en partes convenientes para su traslado o eventualmente en longitudes necesarias para la aplicación del producto.

2.3.2.3. Trenzado

- Un mandril sale del centro de la máquina a una velocidad constante mientras carretes móviles se entrecruzan para formar un trenzado que lo envuelve.
- Las preformas poseen excelente conformabilidad, rigidez torsional y resistencia al daño.
- Las fracciones volumétricas que se pueden lograr son menores que en filament winding
- Para lograr el entrecruzamiento, los carretes deben viajar en caminos cruzados a medida que recorren el perímetro de la máquina.
- Pueden contener desde 3 carretes hasta 800.
- Se puede lograr espesores mayores pasando sucesivamente por encima de la preforma.
- No se pueden colocar las fibras a 90°, salvo que la maquina tenga incorporada operaciones de filament winding.

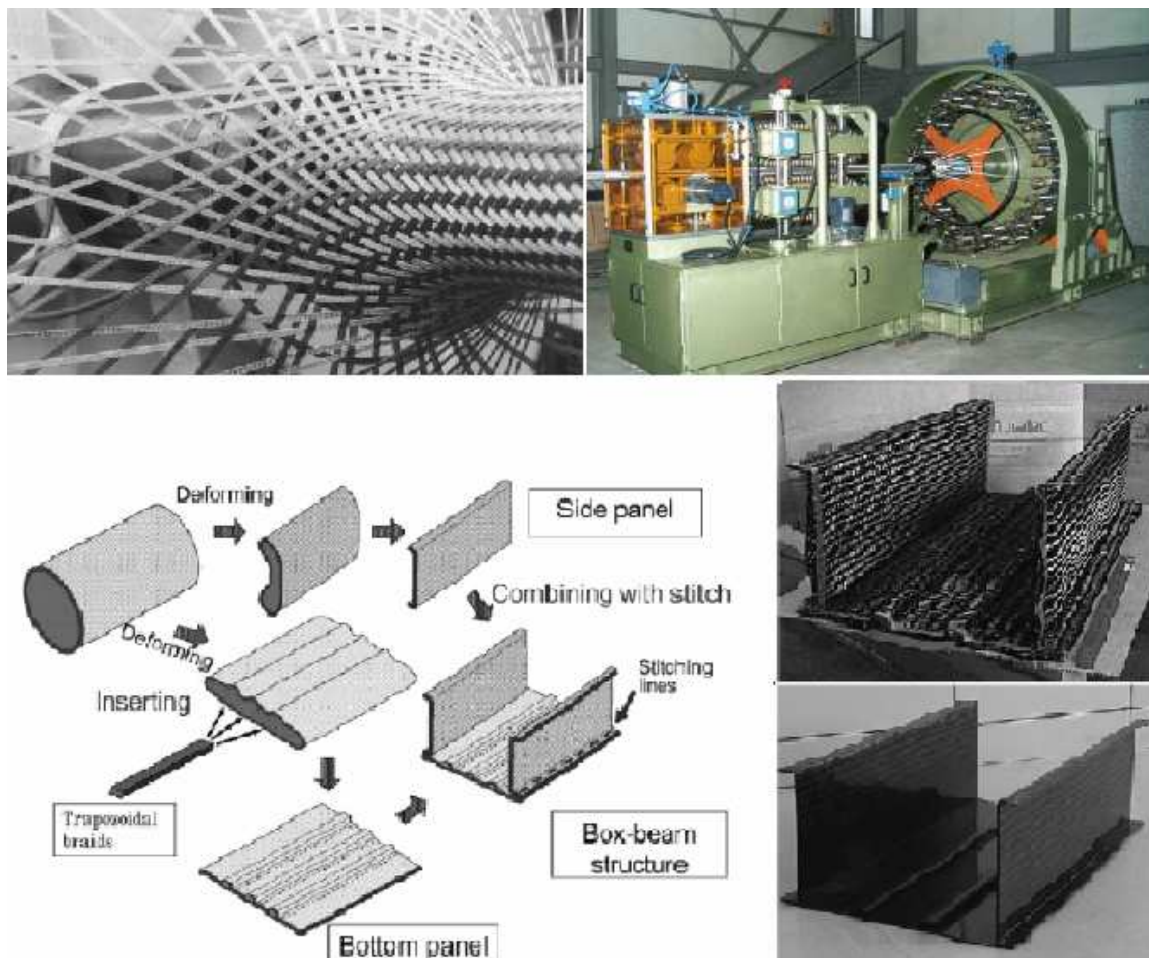


Fig. 30: Trenzado y algunas aplicaciones

2.3.2.4. Moldeo por bolsa de vacío

Este proceso de moldeo consiste en la aplicación de una presión uniforme al laminado antes del proceso de curado, con el objetivo de mejorar la consolidación de la fibra y la eliminación del exceso de resina, aire y volátiles de la matriz. Esta presión se aplica con la ayuda de un diafragma flexible o una bolsa de vacío.

La aplicación de la bolsa de vacío se realiza una vez terminada la laminación. La preparación del mismo se realiza de la siguiente manera:

- Aplicación del sellador: Consiste en aplicar un sellador (Ban Ban) en el perímetro, para lo cual debe realizarse previamente una limpieza de la zona en donde va a ser aplicado para eliminar el desmoldante y cualquier agente que pueda perjudicar el correcto sellado.
- Desmoldante: Debe aplicarse en la parte superior del laminado para prevenir que se adhiera con los elementos utilizados en la bolsa de vacío. Algunas veces se utiliza un separador para dejar una marca o huella sobre la superficie que permita ser adherida a otra en un proceso posterior. (Tejido de teflón).

- Canalizador de vacío: Es una lámina intermedia de sangrado (Nylon perforado) que ayuda a distribuir el vacío y permite el pasaje de volátiles hacia el canalizador de aire.
- Canalizador de aire: Se coloca en el borde fuera del laminado y conduce los gases hacia la válvula de evacuación.
- Absorbedor de resina: La cantidad de capas de absorbentes a colocar depende de la proporción de resina del laminado.
- Bolsa de vacío: esta bolsa es un Nylon el cual es adherido al sellante dejando orejas intermedias para permitir que la bolsa se ajuste a la pieza y cerrándolas herméticamente.

El Vacuum bagging permite la producción de piezas grandes de compuestos de alta calidad y bajo costo. Las principales ventajas del método por bolsa de vacío son que el equipamiento de vacío y curado puede ser usado para una gran variedad de piezas. La dimensión de la pieza que puede ser hecha por bolsa de vacío está limitado solo por el equipamiento de curado, incluyendo la dimensión del horno de curado o autoclave. Sin embargo la calidad de las piezas depende de la habilidad del operario.

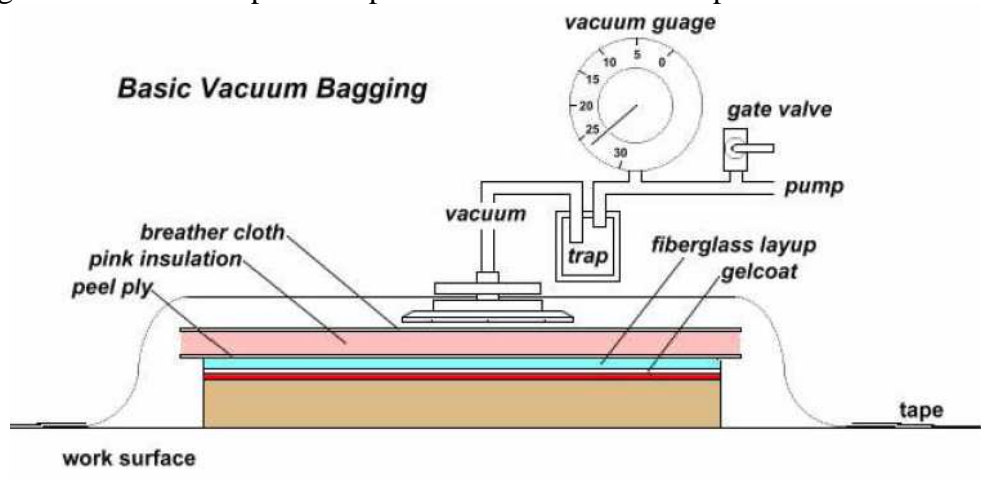


Fig. 31: Técnica de fabricación mediante bolsa de vacío

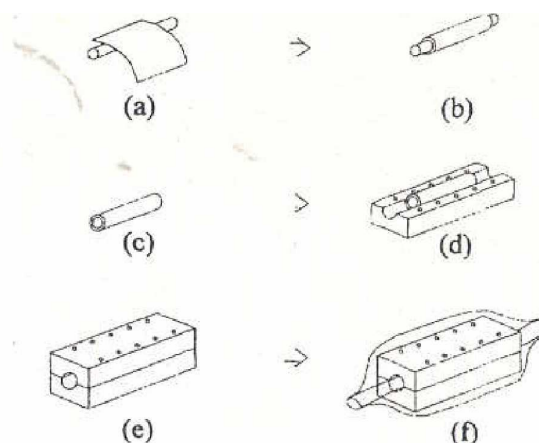


Fig. 32: Diagrama esquemático de la secuencia de fabricación de una viga de impacto de sección circular [5]

2.3.3. Comportamiento dinámico. Parámetros de diseño de elementos tubulares

En décadas anteriores, los materiales compuestos se adoptaron en una amplia gama de aplicaciones, incluidas las industrias de construcción y automoción. Para estructuras sujetas a cargas de impacto, la resistencia a este tipo de sollicitación es muy deseada y depende de los mecanismos de absorción del sistema. Los mecanismos de absorción de los materiales compuestos de fibra reforzada han sido estudiados [4] y son conocidos. Sin embargo, los mecanismos de absorción de energía para tubos de material compuesto sometidos a flexión, pultruidos o procedentes de otros métodos de fabricación, no están ampliamente estudiados y por tanto, su comportamiento no está bien comprendido.

La energía inicial del percutor es importante pero también hay otros parámetros a considerar. Una elevada masa con poca velocidad puede causar el mismo daño que una baja masa con gran velocidad, aun teniendo la misma energía cinética. Los estudios experimentales intentan repetir las situaciones de impacto bajo condiciones controladas.

Los percutores pesados son habitualmente guiados por un carril durante su caída libre desde una distancia dada.

Tan pronto como el percutor está en contacto con la probeta, una onda de compresión, una onda de cortante y la onda superficial se propaga por el punto de impacto. Para bajas velocidades de impacto no se introduce daños importantes durante las primeras etapas de impacto. Esto es, los niveles de tensión se mantienen bajos debido a que estas ondas viajan mucho tiempo por el espesor de la lámina y entonces la probeta se deforma como una placa [6].

Aunque el daño del tubo resulta en una reducción de la rigidez a flexión, esto permite que la energía de impacto se absorba sobre un área de deformación creciente. Además, el fallo progresivo por separación y rasgado del tubo, redistribuye las tensiones sobre un área mayor del tubo, reduciendo la posibilidad de ruptura en el punto de impacto [4]. Así, el daño progresivo a lo largo de toda la longitud del tubo se convierte en una característica deseable que promueve una utilización del material [4].

Para cargas dinámicas, se espera diferentes respuestas de propagación de fractura.

Las curvas de energía resistente obtenidas del análisis de crecimiento de fractura prescrito, se muestran en la figura 26. Al comienzo de la extensión de la fractura, las curvas de energía resistente estática casi coincidían con las curvas de energía resistente total. A medida que la fractura avanzaba, la diferencia entre estas curvas aumentaba gradualmente, indicando un incremento de la energía dinámica liberada por la propagación de la fractura. Durante la propagación de la fractura desde 0 hasta 26mm, la carga de fractura en modo III dominaba la propagación de la fractura (como se esperaba) debido a la flexión hacia debajo de la cara superior. A medida que la fractura avanzaba más, la carga de fractura en modo I dominaba hasta que las caras laterales se doblaban hacia fuera. Durante estos intervalos se produce una pequeña pendiente en la grafica de energía resistente- extensión de fractura.

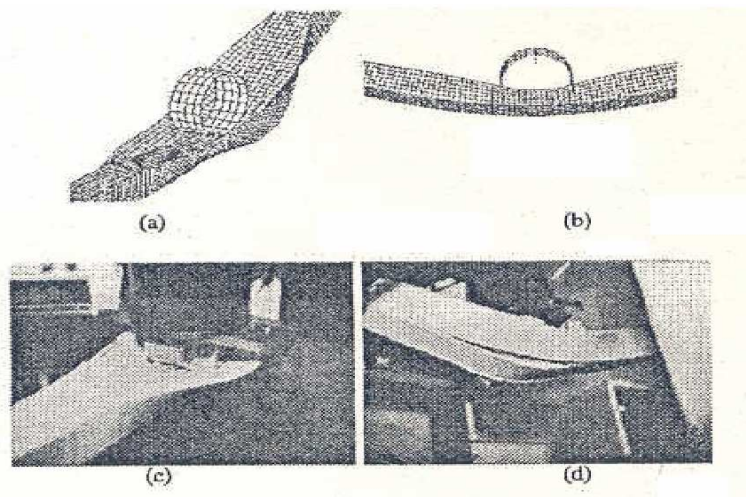


Fig. 33: Fallo progresivo de rasgado en el modelo de elementos finitos comparado con el ensayo experimental. a) Separación de pared superior en modelo MEF, b) Pared inferior sin separación en MEF, c) Separación pared superior en experimento. D) Separación pared inferior en experimento

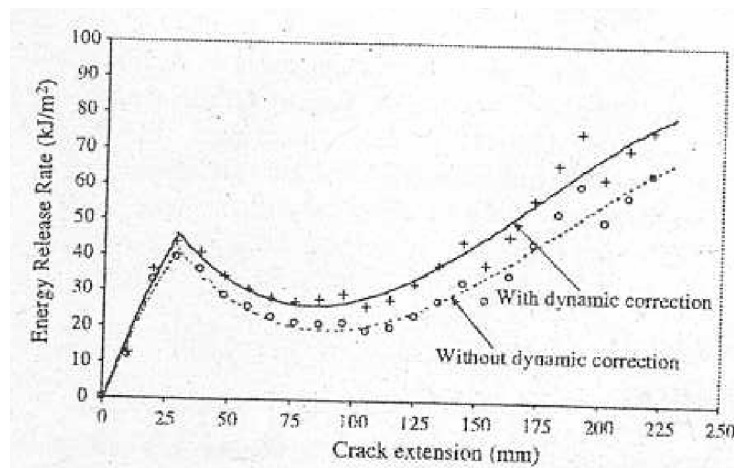


Fig. 34: Curva de energía resistente para un tubo de pared delgada, con fractura inicial de 76.2mm [4]

Para investigar las características dinámicas de las barras de impacto se desarrolló un test de impacto, dentro del estudio realizado por Seong Sik Cheon et ál [5], cuya velocidad de impacto se incrementa con un cilindro neumático. También se hicieron estudios de comportamiento a flexión en vigas de material compuesto en los que se hizo un análisis teniendo en cuenta la influencia de diferentes parámetros en el artículo de Saiphon Charoenphan, Lawrence C. Bank, y Michael E. Plesha [4]

A continuación se tratara de entender los parámetros de diseño que influyen en el comportamiento a flexión de los tubos de material compuesto. Se busca proporcionar unas guías de diseño cualitativas para el diseño de materiales compuestos. La selección adecuada de estos parámetros, permite mejorar la eficiencia de los materiales tanto en capacidad de carga como en absorción de energía, a la vez que se busca minimizar el coste de fabricación.

Del estudio realizado por Seong Sik Cheon et ál [5], y Saiphon Charoepahan et ál [4] se extraen los siguientes parámetros de diseño

- 1.-Efecto de la geometría del tubo
 - a. Grosor de sección transversal
 - b. Forma de la sección transversal
 - c. Dimensiones de las vigas.
- 2.- Efecto de ensayo estático-dinámico
- 3.- Efecto de la temperatura

Todos estos parámetros, se tuvieron en cuenta al simular una viga estándar cuadrada de 55x55 mm de lado, y 3.96 mm de espesor y 1000 mm de longitud. El material compuesto estudiado fue (FRP) material compuesto de fibra reforzada polimérica pultrusionada [4].

De los resultados obtenidos, aplicando los parámetros anteriores y comparándolo con los resultados de la viga de referencia, se sacan las siguientes conclusiones:

1a.- Incrementando la cantidad de material en los tubos, se incrementa la propagación de fractura de la viga. Para tubos de sección doble, se produce una propagación rápida y también frágil de la fractura. Se produce una repentina bajada de la carga (grafica carga-desplazamiento) y esto puede ser debido a un predominio del modo I de crecimiento de fractura, aunque estos tubos proporcionan la mayor capacidad de carga [4].

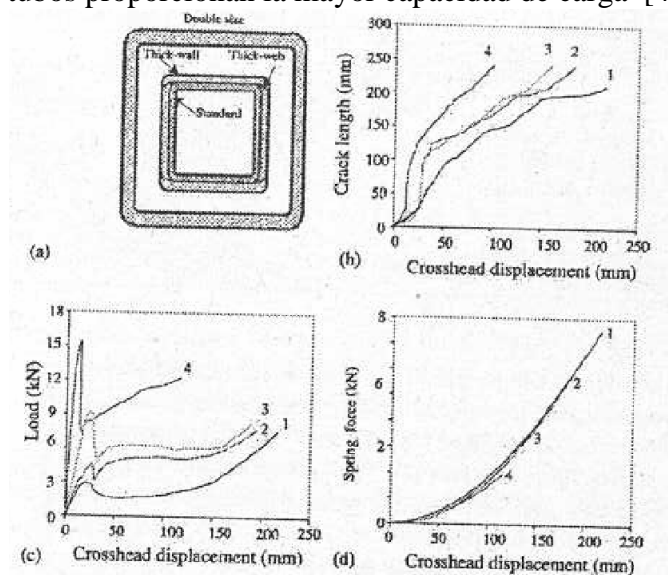


Fig. 35: Resultados en tubos con gran sección comparados con los tubos estándar. 1) Tubo estándar, 2) Tubo de laterales delgados, 3) Tubo de paredes delgadas, 4) Tubo de doble tamaño, a) Perfil de sección transversal, b) Propagación de fractura, c) Fuerza-desplazamiento, d) Fuerza de muelle [4].

En el estudio de la sección transversal, los resultados muestran que la propagación de fractura es más rápida en los tubos con una sección transversal grande que en los de sección transversal pequeña. Sin embargo, en estos casos, este rápido crecimiento de fractura indica una fractura más frágil, lo cual es poco deseable.

1b.- Los tubos de grandes dimensiones tuvieron más grandes longitudes de fractura que las vigas de menores dimensiones, debido a que estas últimas desarrollan una fuerza de membrana para grandes desplazamientos, que evita la propagación de la fractura [4].

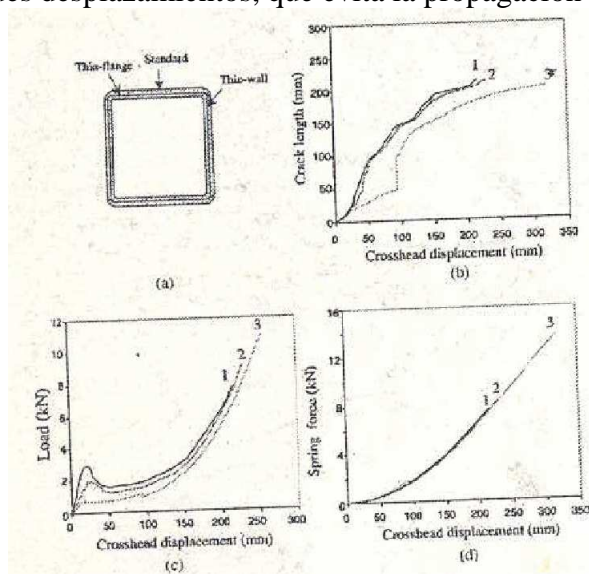


Fig. 36: Resultados en tubos de pequeña sección transversal comparado con el tubo estándar.
 1) Tubo estándar, 2) Tubo de lados superior-inferior delgado, 3) Tubo de lados laterales delgados. a) Sección de perfil, b) Relación de propagación de fractura, c) Fuerza-desplazamiento, d) Fuerza de muelle [4]

1c.- Del estudio del comportamiento de la viga en un ensayo de flexión en tres puntos, en función de su sección transversal, se observó que:

- d. Sección circular: tienen tendencia a abollarse localmente por concentración de carga en un área pequeña. [4]
- e. Sección cuadrada: esta sección, especialmente la reforzada mediante cartelas, costillas o “ribs”, puede resistir cargas comparables con las del acero de alta resistencia, con la ventaja de una reducción de peso de 30% (fibra de vidrio-epoxi) [5]

Forma de la sección transversal	Circular (0,25 kg)	Cuadrada (0,25 kg)	Cuadrada con refuerzo (0,25 kg)	Tipo I (0,25 kg)
Ratio de absorción de energía	53,2%	52,9%	52,5%	53,3%

Tabla 3: Influencia de la sección [5]

2.-De los ensayos dinámicos se concluye que las vigas de material compuesto sometidas a impacto, tienen mejor capacidad de absorción de energía de impacto, que las vigas de acero de alta resistencia.

En ensayos estáticos, se observa que la dependencia de la sección transversal tiene más importancia que en los ensayos dinámicos.

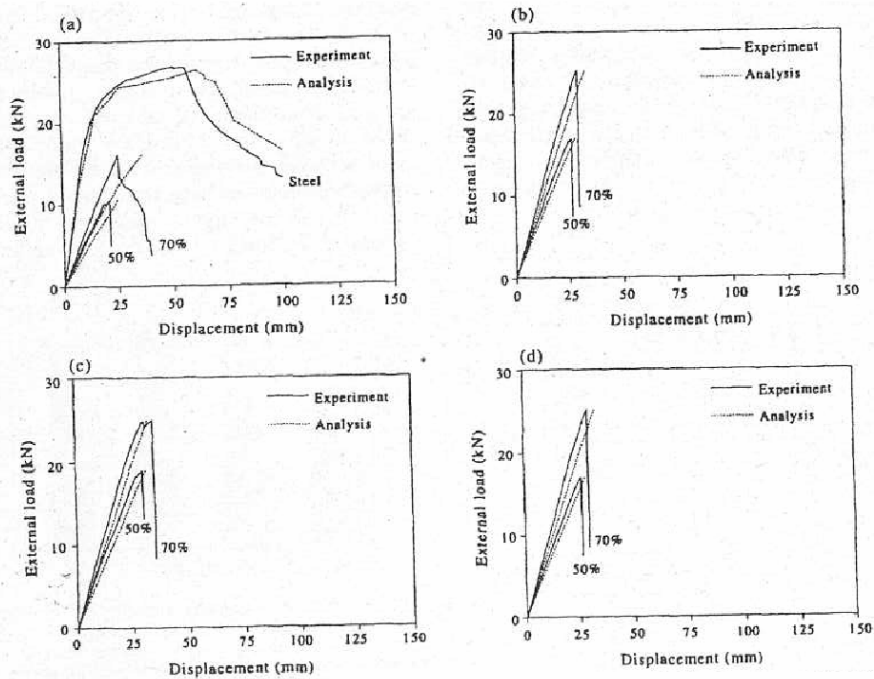


Fig. 37: Comparación entre los resultados de la prueba estática y el análisis de elementos finitos. A) Sección circular, b) Sección cuadrada, c) Sección cuadrada reforzada mediante cartelas (rib), d) Sección tipo H

3.-La capacidad de absorción de energía de impacto para las vigas de acero de alta resistencia, sufren una abrupta caída de resistencia cuando se somete a temperaturas de -10°C , por lo que se puede concluir que la temperatura que anula la ductilidad del acero de alta resistencia ronda los -10°C ; por el contrario, la viga de material compuesto (fibra de vidrio-epoxi) presenta una resistencia a flexión casi constante bajo las mismas temperaturas.

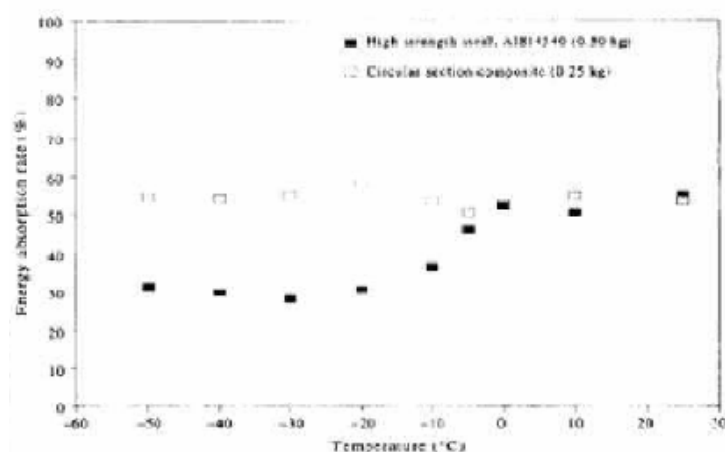


Fig. 38: Influencia de la temperatura en impactos dinámicos

Por otra parte, en el artículo de Ramin Hosseinzadeh, Mahmood M. Shokrieh, Larry B. Lessard [11], se hizo el estudio de parachoques de vehículos de pasajeros; de este artículo se sacaron otros parámetros analizados:

- a) Material: de que manera la sección transversal del material puede afectar las especificaciones de impacto y qué clase de material puede ser usado como sustituto con el fin de disminuir costes.
- b) Forma: influencia de los pequeños cambios y modificaciones y su resultado para facilitar los procesos de fabricación y disminuir el volumen de material utilizado, sin disminuir la resistencia al impacto.
- c) Comportamiento a impacto: influencia de las pruebas sobre los parámetros anteriores sobre el comportamiento a impacto.

El objetivo de la investigación, fue desarrollar y proponer sustitutos para el parachoques, el cual debería satisfacer los siguientes requisitos [11]:

- 1. Facilidad de fabricación, debido a la simplificación de la forma. Esto se consiguió, eliminando todos los elementos rigidizadores existentes en los parachoques de reales.
- 2. Economización mediante el uso de materiales compuestos de bajo coste, como el GMT (Glass Mat Thermoplastic).
- 3. Conseguir una reducción o igualación en el peso del parachoques fabricado en GMT.
- 4. Conseguir un comportamiento a impacto mejor o similar que con los parachoques usados actualmente.

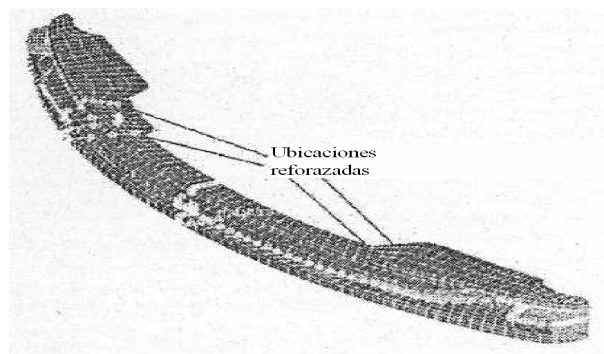


Fig. 39: Zonas reforzadas en un parachoques de SMC [11]

2.4. Criterio de rotura de Hashin

Actualmente, se pueden encontrar distintos criterios que permiten predecir el fallo en materiales compuestos. Algunos de estos criterios son el criterio de Hashin (1973 y 1980), el criterio de Yamada y C.T. Sun (1978), el criterio de Chang Chang (1987), el criterio de Shaid y Chang (1993 y 1995), el criterio de Christensen (1988), el criterio de Hart-Smith (1989)...Todos estos criterios tratan de predecir cómo se degrada el material cuando el material sufre algún tipo de impacto. De todos estos criterios, uno de los de mayor importancia histórica es el de Hashin. Este criterio supone el inicio de una forma diferente de abordar la generación de criterios de fallo para materiales compuestos. Hashin en primer lugar reconoce los modos de fallo para posteriormente reconocer las variables asociadas con estos modos y proponer una interacción entre ellas.

El autor propone el criterio en el contexto de un estudio de fatiga. Este criterio es propuesto para laminados unidireccionales y no dice nada acerca de la interacción entre las tensiones en laminados que no sean de tal tipo y sus respectivos efectos en el fallo (deslaminaciones) o acerca de la degradación de las propiedades cuando se alcanzan los valores límites del criterio.

Hashin, establece la necesidad de crear un criterio de fallo para materiales compuestos basado en los mecanismos de fallo de estos materiales. Basándose en la experiencia obtenida de los ensayos que realiza, los mecanismos de fallo se pueden simplificar en: el fallo provocado por la rotura del refuerzo o el fallo provocado por la rotura de la matriz.

En la literatura, se pueden encontrar dos propuestas de criterios de fallo realizados por Hashin para materiales compuestos. La primera propuesta fue realizada en el año 1973 en colaboración con Rotem. La segunda propuesta de criterio de fallo fue llevada a cabo por Hashin en el año 1980.

El software comercial Abaqus introdujo recientemente el criterio de Hashin como criterio de predicción del daño en materiales compuestos y como ya se expuso en el objetivo de este trabajo, se pretende ver si el criterio implementado en el software permite evaluar vigas de tejido sometidos a impactos de baja velocidad.

A continuación, se expone cada una de las propuestas del criterio de Hashin.

2.4.1. Criterio de Hashin-Rotem (1973).

El criterio de Hashin-Rotem, se basa en las observaciones del fallo de probetas fabricadas con tejido multidireccional sometidas a tensión.

Proponen dos mecanismos de fallo: uno basado en el fallo de la fibra y el otro basado en el fallo de la matriz. El primer mecanismo está gobernado por la tensión longitudinal a lo largo de la dirección de la fibra, mientras que el segundo está gobernado por las tensiones transversales y tangenciales con respecto a la dirección longitudinal de la fibra.

Este criterio establece que el fallo se produce cuando se satisface una de las ecuaciones siguientes:

En el caso del fallo de la fibra a tracción:

$$\sigma_{11} = X_T \quad (\sigma_{11}, X_T > 0)$$

Ecuación 2. 1

en donde:

σ_{11} : Es la tensión nominal en la lámina en dirección de las fibras.

X_T : Es la resistencia mecánica a tracción en la dirección longitudinal de la fibra.

Para el fallo de la fibra a compresión:

$$-\sigma_{11} = X_c \quad (\sigma_{11} < X_c > 0)$$

Ecuación 2. 2

en donde:

X_c : Es la resistencia mecánica a compresión en la dirección longitudinal de las fibras.

En el caso del fallo de la matriz a tracción:

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$$

Ecuación 2. 3

en donde:

σ_{22} : Es la tensión nominal de la lámina en la dirección transversal a la dirección de las fibras.

σ_{12} : Es la tensión nominal de cortadura en el plano de la lámina.

Y_T : Es la resistencia mecánica a tracción en la dirección transversal de las fibras.

S : Es la resistencia a cortadura interlaminar en dirección longitudinal de las fibras.

Si el fallo de la matriz es a compresión:

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$$

Ecuación 2. 4

en donde:

Y_c : Es la resistencia mecánica a compresión en la dirección transversal de las fibras.

Con respecto al fallo de la matriz, Hashin no distingue entre si el fallo se produce en la interfaz matriz y refuerzo o sólo en la matriz, por lo que propone que tanto σ_{22} y σ_{12} contribuyen a la aparición del fallo en la matriz. La manera en la que estos valores influyen en el criterio es de tipo cuadrática. Debido a que el material no es sensible en la dirección de la tensión de cortadura, hace que se evite el acoplamiento de términos entre las dos tensiones, llegándose a la siguiente expresión:

$$\left(\frac{\sigma}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{S}\right)^2 = 1$$

Ecuación 2. 5

en donde:

σ_T : Es la tensión nominal de la lámina en la dirección transversal a la dirección de las fibras.

τ : Es la tensión de cortadura.

Y : Es la resistencia mecánica en la dirección transversal de las fibras.

Esta expresión se ha usado de manera extensiva, desde la aparición de este criterio.

2.4.2. Criterio de Hashin (1980).

En 1980 Hashin revisa el criterio propuesto en 1973 y establece algunas modificaciones, con el objeto de incorporar otros mecanismos de fallo al criterio en los que se distinga entre el estado de tracción y el de compresión tanto para el fallo asociado a la rotura de la fibra, como para el fallo provocado por la rotura de la matriz.

La manera en que se alcanzaba el criterio de fallo en la propuesta de 1973 era partir del mecanismo de fallo para establecer las variables asociadas al proceso de daño y una vez que estas son conocidas establecer el criterio de fallo. En este nuevo criterio, la forma de establecer el mismo es realizar en primer lugar una distinción de los mecanismos de daño existentes para así, tomando como punto de partida el mecanismo de daño, identificar cuáles son las variables asociadas al mismo y así poder establecer el criterio.

En principio, Hashin desarrolló este criterio como un caso en tres dimensiones (3D), a diferencia del criterio desarrollado en 1973, que se limitaba a dos dimensiones (2D). Posteriormente, el criterio de 1980 lo particulariza para un caso bidimensional.

Así, hay cuatro expresiones desarrolladas por Hashin para el caso 3D y su posterior particularización para el caso 2D.

Criterio de Hashin 3D (1980).

Modo de fallo de la fibra a tracción:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \frac{1}{S^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad \text{ó} \quad \sigma_{11} = X_T$$

Ecuación 2. 6

en donde:

σ_{13} : Es la tensión nominal de cortadura en el plano formado por las direcciones 1 y 3.

Modo de fallo de la fibra a compresión:

$$|\sigma_{11}| = X_C$$

Ecuación 2. 7

Modo de fallo de la fibra a tracción:

$$\frac{1}{Y_T^2}(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_T^2}(\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0)$$

Ecuación 2. 8

en donde:

σ_{33} : Es la tensión nominal de la lámina en la dirección perpendicular al plano del laminado.

σ_{23} : Es la tensión nominal de cortadura en el plano formado por las direcciones 2 y 3.

Modo de fallo de la fibra a compresión:

$$\frac{1}{Y_c} \left[\left(\frac{Y_c}{2S_T} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{4S_T^2} (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_T^2} (\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S^2} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1$$

Ecuación 2. 9

en donde:

S_T : Es la resistencia a cortadura interlaminar en dirección transversal de las fibras, es decir el máximo valor admisible de la tensión de cortadura σ_{23}

Criterio de Hashin 2D (1980).

Fallo para la fibra a tracción $\sigma_{11} > 0$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S} \right)^2 = 1$$

Ecuación 2. 10

Fallo para la fibra a compresión $\sigma_{11} < 0$

$$|\sigma_{11}| = X_c$$

Ecuación 2. 11

Fallo para la matriz a tracción $\sigma_{22} > 0$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S} \right)^2 = 1$$

Ecuación 2. 12

Fallo para la matriz a compresión $\sigma_{22} < 0$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S_T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S} \right)^2 = 1$$

Ecuación 2. 13

Se debe de mencionar que en la última expresión, Y_c tiene que ser tomada en valor absoluto, mientras que σ_{22} mantiene su signo. Esta condición resulta importante para el segundo término de la expresión anterior.

2.5. Ventajas del uso de modelo numérico

La simulación asistida por ordenador presenta muchas ventajas, todas ellas relacionados con las enormes capacidades de cálculo que los ordenadores ofrecen, para la resolución de un gran número de problemas de ingeniería:

1. La simulación permite analizar grandes problemas complejos para los que no están disponibles resultados analíticos. De hecho, la mayoría de los problemas del mundo real encajan en esta categoría. La simulación proporciona una alternativa práctica.
2. Como con cualquier forma de simulación, la simulación por ordenador permite obtener información de diferentes casos de simulación, lo más cercanos posible al caso real. Ahorro de recursos materiales, económicos y humanos.
3. Permite ahorrar tiempo debido a que una misma situación de análisis se puede simular en varios casos simultáneamente en varios ordenadores.
4. Algunas técnicas analíticas requieren de experiencia matemática sofisticada, tanto para utilizarlas como para comprenderlas. Una simulación por ordenador pueda requerir pocas o ningunas matemáticas complejas y por tanto, puede ser intuitivamente más comprensibles. Por esta razón, la simulación por computadora puede usarse aún cuando el problema pueda analizarse usando técnicas matemáticas.

Sin embargo, el uso de las técnicas numéricas por ordenador, presentan algunos inconvenientes que hay que tener en consideración;

1. Para obtener estimaciones lo mas exactas posibles y para minimizar la probabilidad de tomar una mala decisión, se debería
 - a) hacer un gran número de ensayos en cada simulación y/o;
 - b) repetir toda la simulación un gran número de veces.
2. Cada simulación requiere su propio diseño especial para imitar la situación real bajo investigación. Puede resultar complicado imitar unas condiciones totalmente reales de una simulación numérica.

Como resultado de estas desventajas, siempre que fuera posible, se debería intentar resolver un problema usando técnicas analíticas.

Capítulo 3

Modelo Numérico

En este apartado se va a explicar los pasos llevados a cabo para desarrollar la modelización del problema de impacto mediante el empleo del software comercial de elementos finitos ABAQUS, versión 6.7. Al tratarse de un problema dinámico, se empleará el módulo ABAQUS/ EXPLICIT.

3.1. Materiales

Material del percutor

El material del que está fabricado el percutor es de acero.

El valor de la densidad tomado para la realización de la simulación se tuvo que modificar para conseguir representar la situación real de los ensayos. Para conseguirlo, se dividió el peso total de la cabeza del percutor y la masa del sistema auxiliar de guiado entre el volumen del percutor:

- Masa: para masa del conjunto se tomó la masa de la cabeza del percutor, a la que se sumó la masa correspondiente al sistema auxiliar de guiado de la torre de caída, resultando un total de $m = 6.128 \text{ kg}$.
- Volumen: este valor se obtuvo de las propiedades geométricas que proporciona el software ABAQUS, resultando un valor de $V = 39.81 \text{e-}6 \text{m}^3$.
- Densidad:

$$\rho = \frac{m}{vol}$$

Ecuación 3. 1

Donde:

ρ : es la densidad

m : es la masa del conjunto percutor y sistema auxiliar.

vol : es el volumen de percutor

Material del apoyo

El material del que están formados los apoyos, es de acero. Por esta razón, las propiedades que se introducirán en Abaqus para su simulación, serán todas aquellas correspondientes con el acero, tales como densidad, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

Material de la probeta

La probeta que se utilizó para la realización del ensayo fue una probeta de material compuesto con sección de cajón de 35 mm de lado, 480mm de longitud y 2.2 mm de espesor. Los materiales que lo constituye son:

- Tejido laminado equilibrado (tafetán) de fibra de carbono AS4.
- Matriz epoxi 8552 HEXCEL.



Fig. 40: Probeta rela ensayada

Algunas de las características de estos materiales son:

Tejido tafetán

La fibra de carbono AS4 es una fibra continua, de elevada resistencia, basada en PAN (fibra de poli acrilonitrilo, que es un polímero elástico orgánico, resinoso y fibroso). Esta fibra se ha tratado superficialmente y se puede medir para mejorar sus propiedades a cortante interlaminar, características de manejabilidad, y propiedades estructurales y se recomienda su uso en tejidos, filamentos bobinados prepreg, trenzados y pultrusionados.

Propiedades típicas de fibra	Unidades U.S.	Unidades SI
Tensile Strength	643 ksi	4,433 MPa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	33.5 Msi	231 GPa
Ultimate Elongation at Failure	1.8%	1.8%
Density	0.0647 lb/in ³	1.79 g/cm ³
Weight/Length		
3K	11.8 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.210 g/m
6K	23.9 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.427 g/m
12K	48.0 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.858 g/m
Approximate Yield		
3K	7,086 ft/lb	4.76 m/g
6K	3,485 ft/lb	2.34 m/g
12K	1,734 ft/lb	1.17 m/g
Tow Cross-Sectional Area		
3K	1.82 x 10 ⁻⁴ in ²	0.12 mm ²
6K	3.70 x 10 ⁻⁴ in ²	0.24 mm ²
12K	7.43 x 10 ⁻⁴ in ²	0.48 mm ²
Filament Diameter	0.280 mil	7.1 microns
Carbon Content	94.0%	94.0%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

Tabla 4: Propiedades fibra de carbono [9]

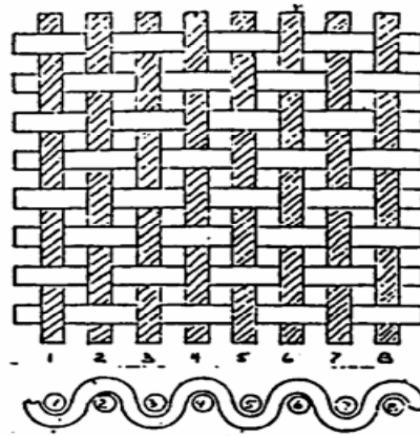


Fig. 41: Tejido fatetán

Matriz epoxi 8552

Es una matriz epoxi con grandes prestaciones resistentes para aplicaciones en estructuras espaciales importantes. Presenta buena resistencia al impacto y tolerancia a daños para un amplio rango de aplicaciones.

Fue desarrollado como un sistema de flujo controlado para trabajar en ambientes con temperaturas superiores a 121 °C (250 °F).

Ventajas y características

- Matriz epoxi resistente con excelentes propiedades mecánicas
- Rendimiento a elevadas temperaturas
- Buena interacción con propiedades de fibras.
- Válido para varios tipos de refuerzos
- Flujo de matriz controlado durante el procesamiento.

Propiedades de resina matriz

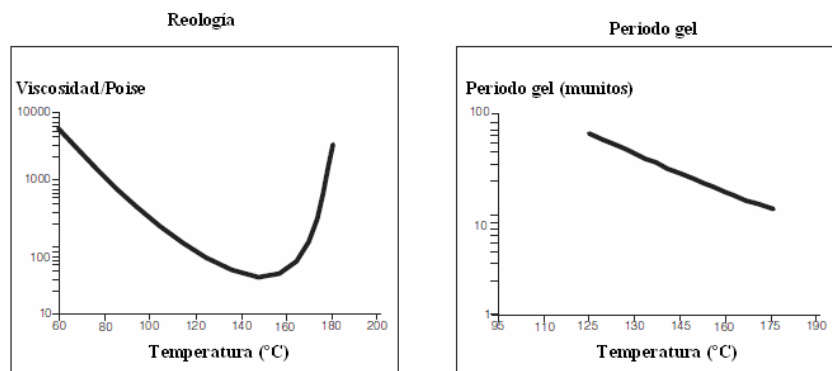


Fig. 42: Propiedades de matriz epoxi [9]

La fabricación de las mismas cayó a cargo del INTA.

3.2. Modelos de impacto

En este apartado se incluyen tres modelos numéricos realizados en Abaqus, el primero de los cuales corresponde a un modelo entero de los ensayos reales llevados a cabo en la torre de caída, el segundo corresponde a un modelo con una simetría, y el último uno con doble simetría.

3.2.1. Modelización geométrica

Modelización de percutor entero

El percutor impacta directamente con la estructura y representa una geometría igual a la de los ensayos. En la máquina de ensayo disponible en el laboratorio, como ya se ha explicado, el percutor se compone de un conjunto de múltiples mecanismos. Para las simulaciones en el entorno de elementos finitos, sólo importa el radio de punta que tiene en la máquina de ensayo. Para la simulación, se modeliza como una pieza con superficie cilíndrica de radio 30.22mm.

El procedimiento para simular el resto del mecanismo es muy sencillo. Se ajusta la densidad del percutor como la masa del percutor y todo el mecanismo de ensayo en el volumen del percutor. Así, para una misma velocidad de impacto, la energía cinética será la misma que en el laboratorio.

La pieza del percutor del ensayo de torre de caída, queda como se muestra en la siguiente figura.

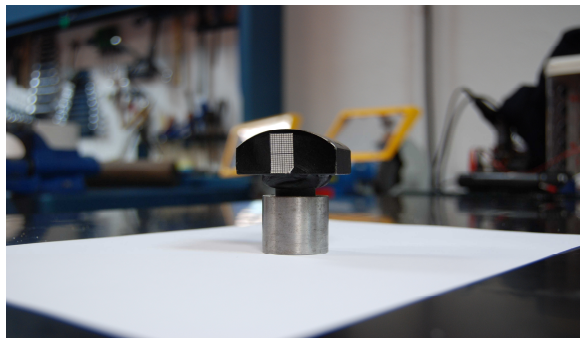


Fig. 43: Percutor de torre de caída

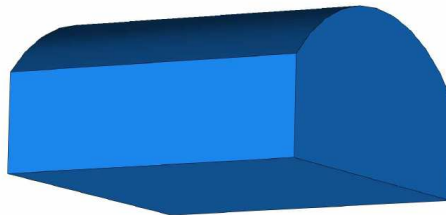


Fig. 44: Modelo de percutor entero de torre de caída

Modelizacion de medio percutor

En este apartado, se mostrará el modelo de percutor utilizado para las simulaciones llevadas a cabo cuando se aplica una simetría al conjunto total.

La pieza del percutor del ensayo de torre de caída, queda como se muestra en la siguiente figura.

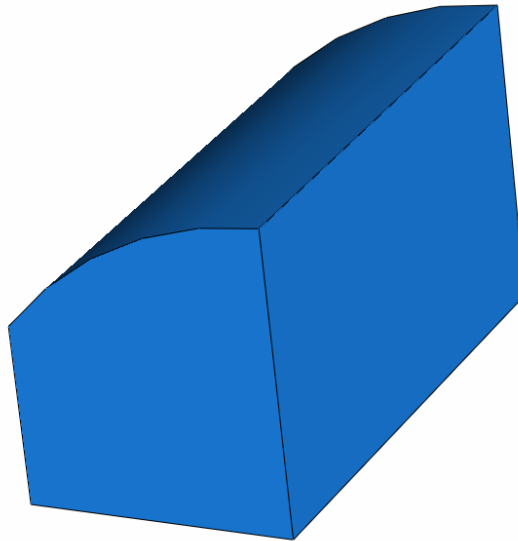


Fig. 45: Modelo de medio percutor de torre de caída

Modelizacion de un cuarto de percutor

En este apartado, se mostrará el modelo de percutor utilizado para las simulaciones llevadas a cabo cuando se aplican dos simetrías al conjunto total.

La pieza del percutor del ensayo de torre de caída, queda como se muestra en la siguiente figura.

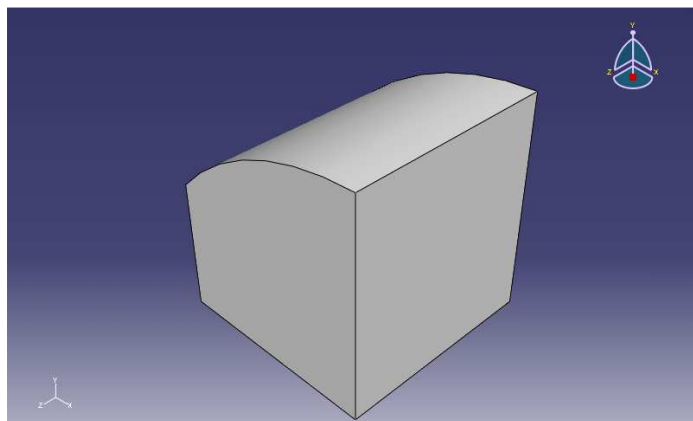


Fig. 46: Modelo de un cuarto de percutor de torre de caída

Modelización de apoyo entero

Los apoyos en el ensayo de laboratorio están hechos de acero, este es el material que se va a introducir en las simulaciones. El material se modeliza como elástico lineal. Como el material de los apoyos es mucho más duro que el de la probeta, este en ningún caso se deformara plásticamente.

Los apoyos tienen un radio de 10 mm, que es el valor de radio que tienen los apoyos de la torre de caída, La anchura de los mismos es de 59 mm.

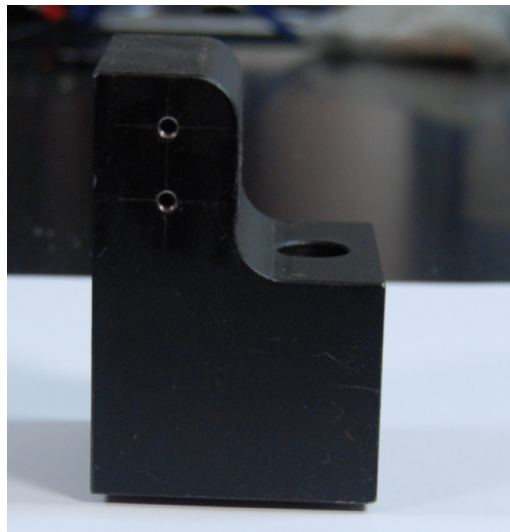


Fig. 47: Apoyo real de torre de caída

Se ha procedido a simplificar la geometría del apoyo, con el fin modelizar la zona en la que el apoyo entra en contacto con la viga, prescindiéndose del resto. La pieza del apoyo del ensayo de torre de caída, queda como se muestra en la siguiente figura.



Fig. 48: Modelo de apoyo entero.

Modelización de medio apoyo

En este apartado, se mostrará el modelo de apoyo utilizado para las simulaciones llevadas a cabo cuando se aplica una simetría al conjunto total.

La pieza del apoyo del ensayo de torre de caída, queda como se muestra en la siguiente figura.

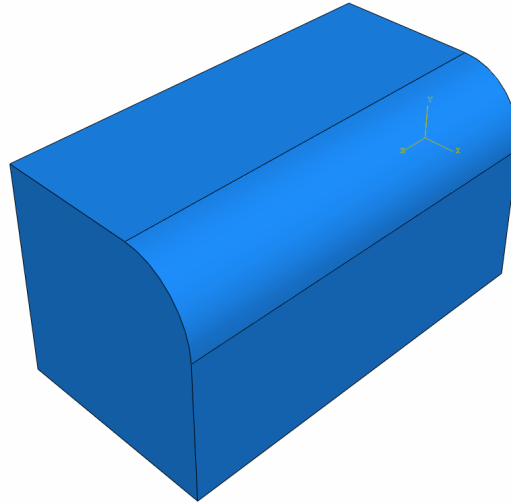


Fig. 49: Modelo de apoyo.

Modelización de un cuarto de apoyo

En este apartado, se mostrará el modelo de apoyo utilizado para las simulaciones llevadas a cabo cuando se aplican dos simetrías al conjunto total.

La pieza del apoyo del ensayo de torre de caída, queda como se muestra en la siguiente figura.

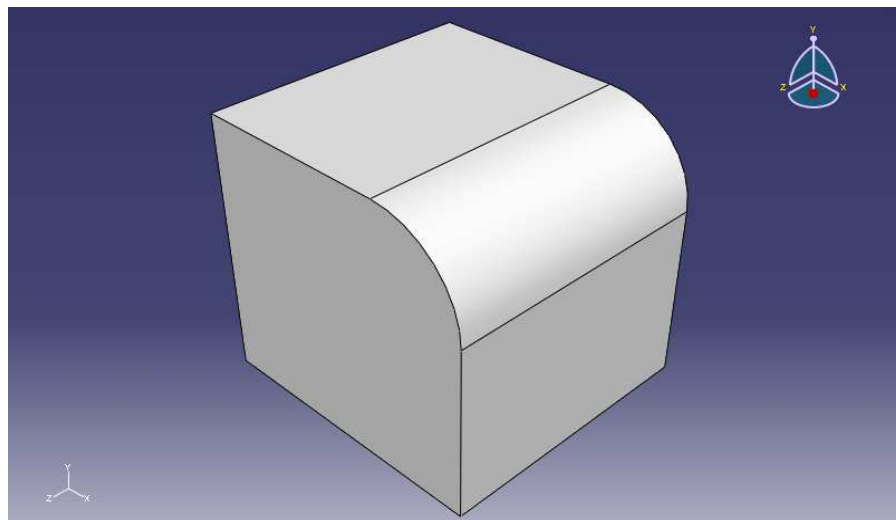


Fig. 50: Modelo de apoyo.

Modelización de probeta entera

En el modelo de la viga se utilizaron elemento tipo shell, como si se tratase de una sola pieza de 35mm de sección cuadrada y 430 mm de longitud, la cual corresponde a la luz de la viga biapoyada.

Una vez creada la pieza, se crean particiones a lo largo de la longitud de la viga para diferenciar las zonas en las que la viga estará más solicitada, como pueden ser la zona central y la correspondiente a los extremos apoyados.



Fig. 51: Probeta real ensayada

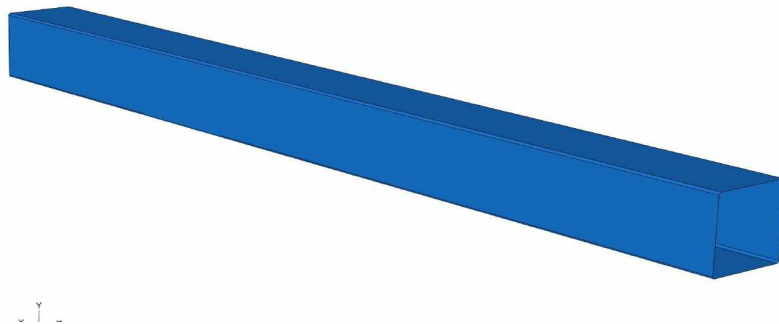


Fig. 52: Modelo de probeta entera

Modelización de media probeta

Se diseño la viga por extrusión y con elementos tipo shell, como si se tratase de una sola pieza de 35mm de sección cuadrada y 215 mm de longitud, la cual corresponde a la mitad de la luz de la viga biapoyada.

Una vez creada la pieza, se crean particiones a lo largo de la longitud de la viga para diferenciar las zonas en las que la viga estará más solicitada, como pueden ser la zona central y la correspondiente a los extremos apoyados.

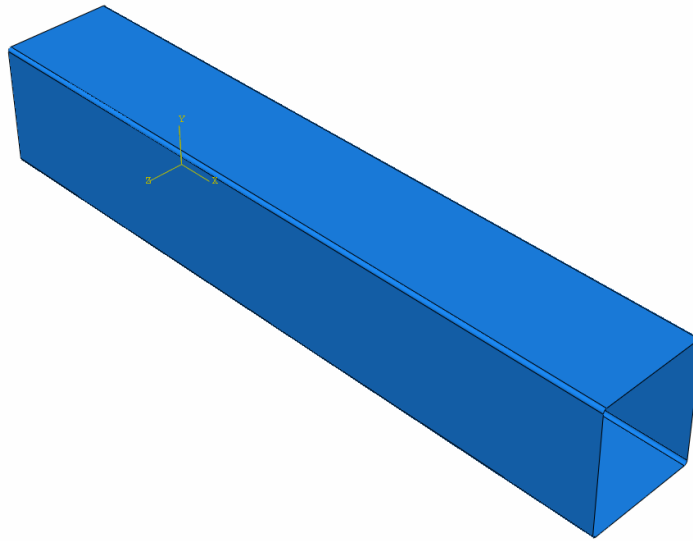


Fig. 53: Modelo de media probeta

Modelización de un cuarto de probeta

Se diseñó la viga por extrusión y con elementos tipo shell, como si se tratase de una sola pieza de 35mm de sección cuadrada y 215 mm de longitud, la cual corresponde a la mitad de la luz de la viga biapoyada y además, 17.5 mm de ancho.

Una vez creada la pieza, se crean particiones a lo largo de la longitud de la viga para diferenciar las zonas en las que la viga estará más solicitada, como pueden ser la zona central y la correspondiente a los extremos apoyados.

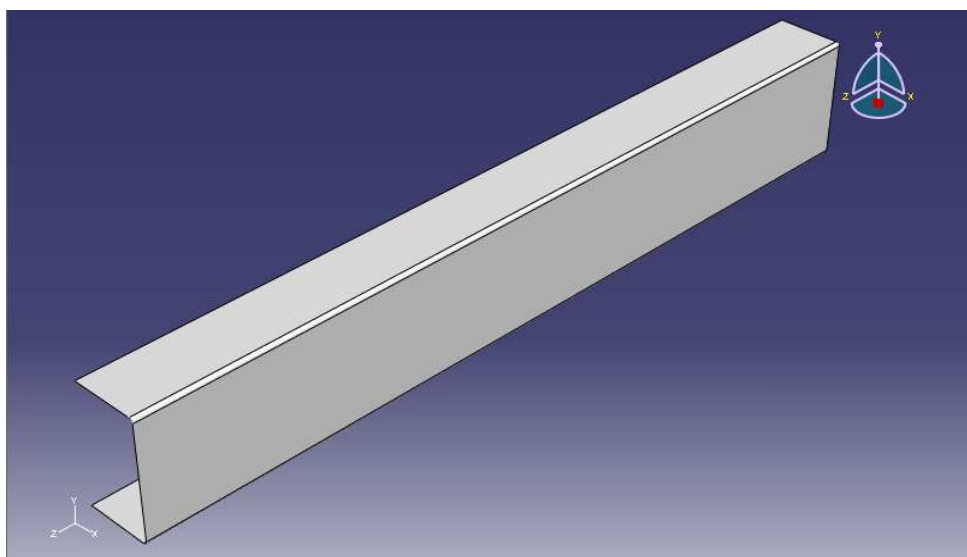


Fig. 54: Modelo de un cuarto de probeta

3.2.2. Interacciones

Para definir las interacciones en el ensayo de torre de caída, primero es necesario definir el contacto, el cual será de dos tipos: tangencial entre la viga y el apoyo, y normal entre la viga y el percutor. El contacto tangencial se define sin rozamiento y el normal como contacto rígido y que se permite la separación después del impacto. Para estos ensayos es muy importante definir la separación posterior ya que en todos los casos el percutor rebota.

Para las interacciones, las superficie maestras serán los apoyos y el percutor, definiéndose como superficie secundaria o esclava, la viga.

Teniendo en cuenta que el ensayo es dinámico y que la viga no se llega a romper, en las interacciones solo se hace interaccionar el percutor con la superficie superior de la viga y los apoyos con la superficie inferior de ella.

Estas interacciones se repiten sin variación para los tres modelos, es decir, tanto para el modelo de viga entera, viga con una simetría y simetría doble, debido a que se mantienen las condiciones de ensayo.

Modelización de viga entera

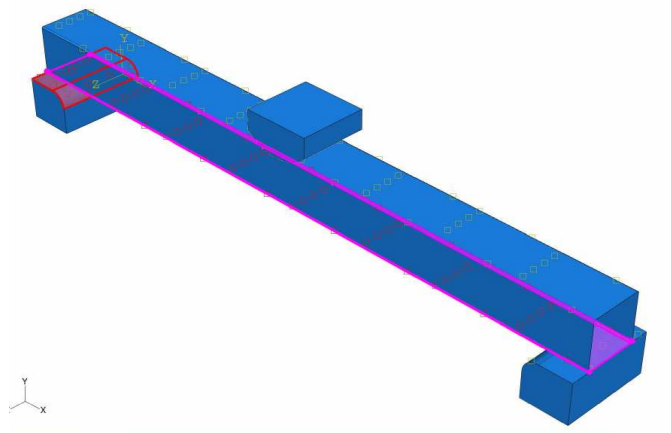


Fig. 55: Contacto definido entre apoyos y viga

En la figura 55 se puede observar la introducción de las interacciones entre la superficie de la viga y la superficie del apoyo en la zona de contacto. Como se dijo anteriormente, este contacto se considera sin rozamiento y del mismo modo, se establecería la misma interacción para el otro apoyo.

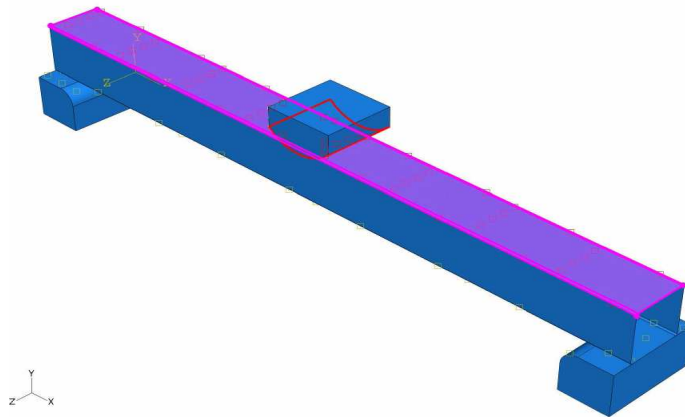


Fig. 56: Contacto definido entre percutor y viga

En este caso, se observa superficies a las que se le asigna las interacciones, imponiéndose en este caso, un contacto normal entre la superficie del percutor y la superficie de la viga.

Modelización de viga con una simetría

En este apartado, se imponen las mismas interacciones entre apoyo-viga y percutor-viga que en el apartado anterior. Se trata del mismo caso, en el que se han introducido una simetría

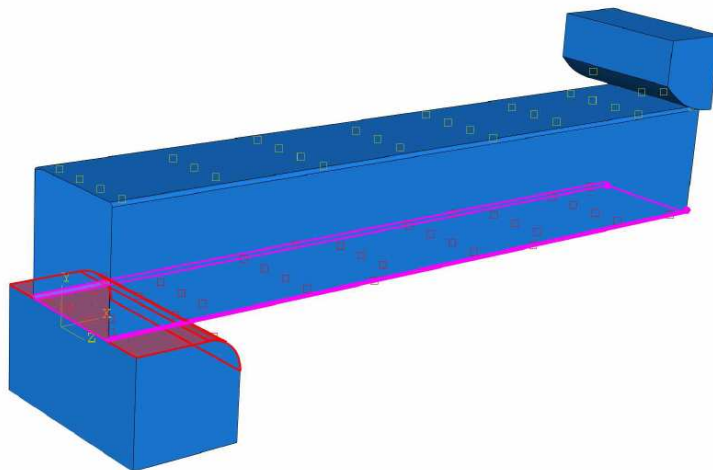


Fig. 57: Contacto definido entre apoyo y viga

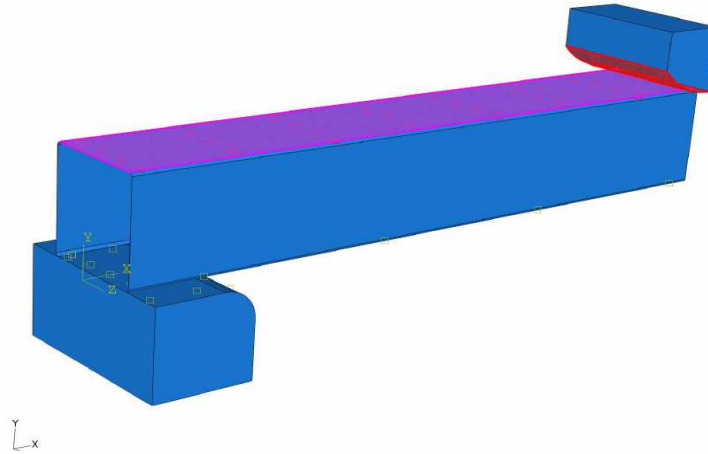


Fig. 58: Contacto definido entre percutor y viga

Modelización de viga con doble simetría

En este apartado, se imponen las mismas interacciones entre apoyo-viga y percutor-viga que en el apartado de viga entera. Se trata del mismo caso, en el que se han introducido dos simetrías.

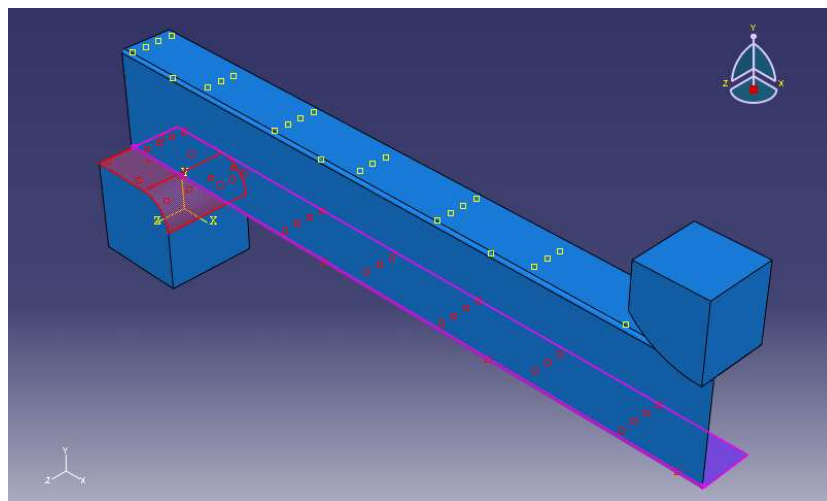


Fig. 59: Contacto definido entre apoyo y viga

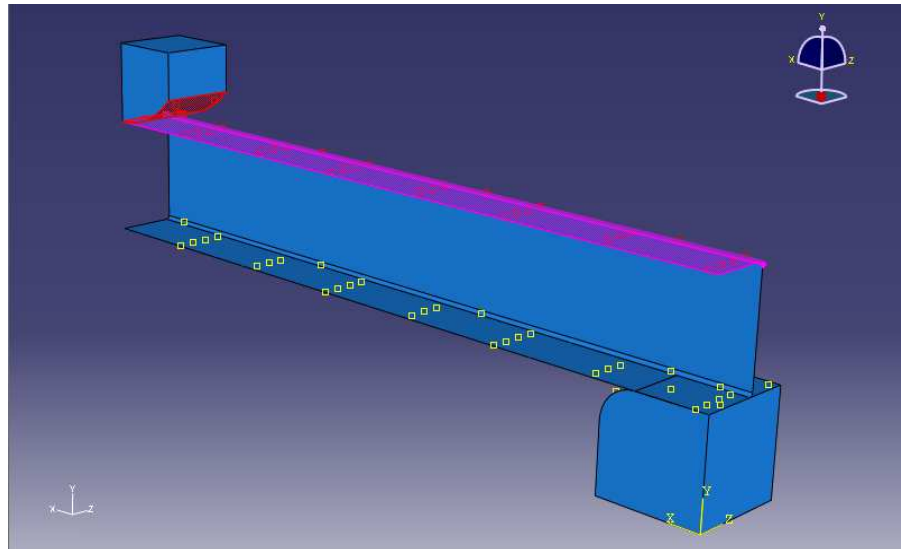


Fig. 60: Contacto definido entre percutor y viga

3.2.3. Condiciones iniciales

La única condición inicial necesaria es la velocidad del percutor en el momento del impacto. El desplazamiento se le aplica a todo el percutor, para que el programa utilice la inercia de toda la pieza entera. Los valores de velocidad que se ensayaran serán: 2,21; 2,55; 2,86; 3,13; 3,5 m/s, se utilizan los mismos valores que en el ensayo de impacto realizado en la torre de caída. El desplazamiento asignado al percutor queda como se muestra en la siguiente figura:

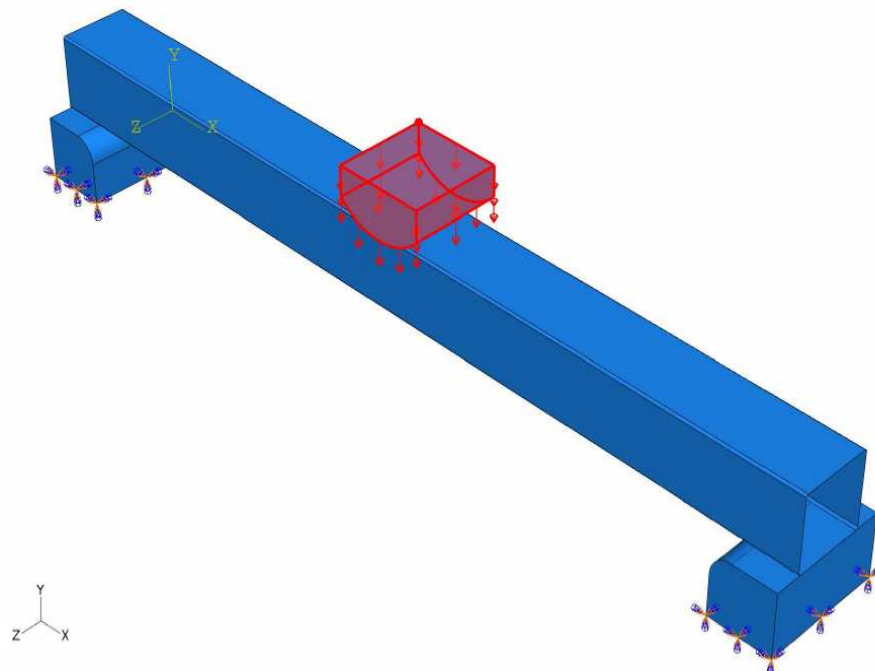


Fig. 61: Asignación de velocidad inicial a la masa del percutor

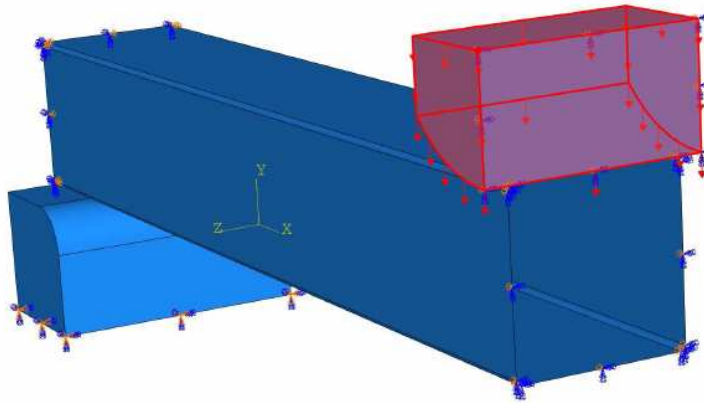


Fig. 62: Asignación de velocidad inicial a masa de medio percutor

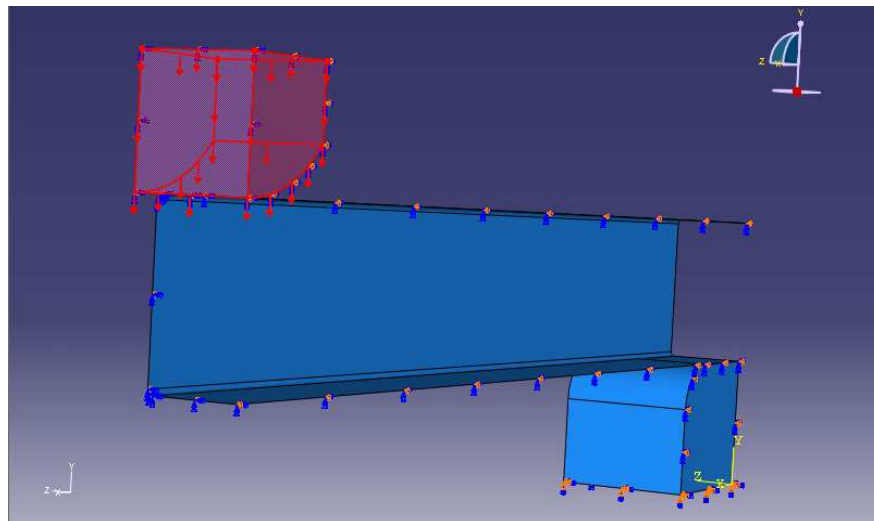


Fig. 63: Asignación de velocidad inicial a masa de un cuarto de percutor

3.2.4. Condiciones de contorno

En este apartado se tendrán en cuenta las condiciones de contorno aplicadas a los tres diferentes modelos, es decir, viga entera, viga de una simetría y viga de doble simetría.

Condiciones de contorno de viga entera

Las condiciones de contorno que se aplican para la simulación, se reducen a:

- La fijación de todos los movimientos de los apoyos.
- Restricción de movimientos en x y z de percutor
- Aplicación de una velocidad en dirección vertical descendente al percutor.

Las restricciones quedan como se muestra en las siguientes figuras.

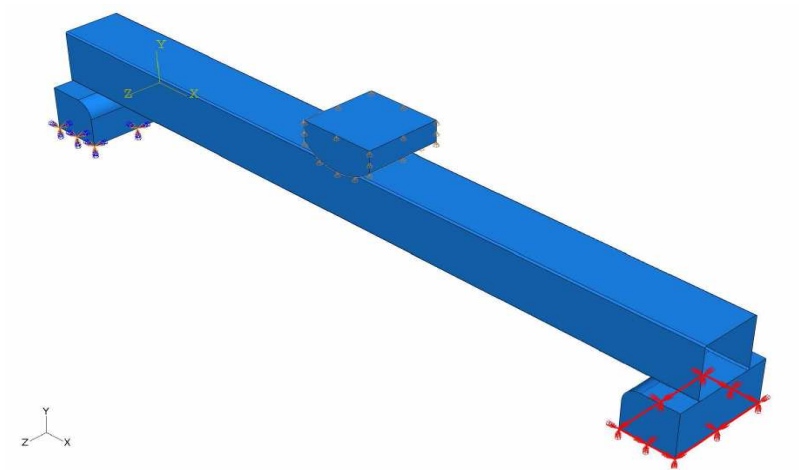


Fig. 64: Fijación del apoyo derecho

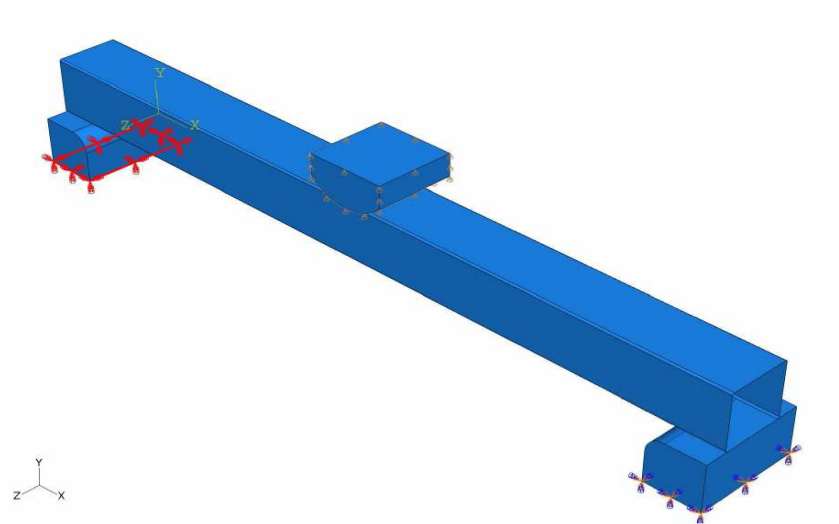


Fig. 65: Fijación del apoyo izquierdo

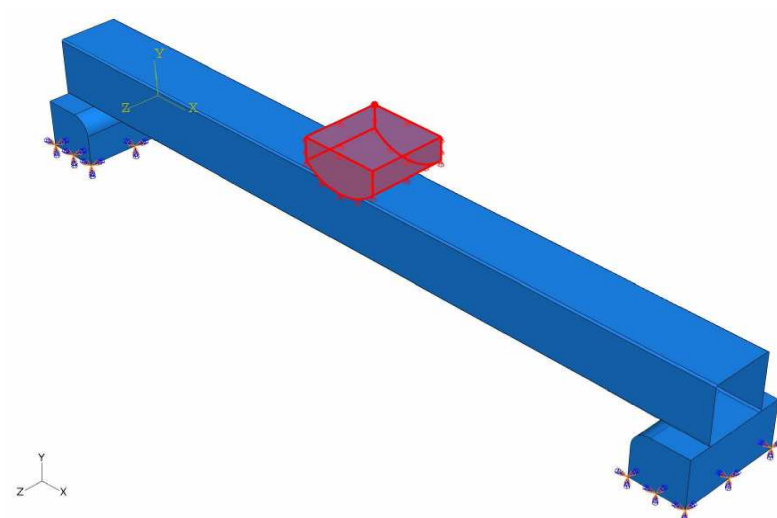


Fig. 66: Asignación de velocidad a toda la masa del percutor

Condiciones de contorno de viga una simetría

Las primeras condiciones de contorno que se deben tener en cuenta son las correspondientes a las simetrías. Cuando se hace una simetría, además de eliminar la mitad, se deben añadir unas condiciones de contorno para que la parte simulada se comporte como si estuviera el modelo completo. Se aplica a la cara por la que se corta y consiste en obligar a que el desplazamiento en la dirección perpendicular a la cara sea cero. Además, el giro en torno a los otros dos ejes debe ser también cero. La explicación es que hay que obligar a que sean nulos los desplazamientos que, si se usara el modelo completo, serían cero. Las caras a las que se les aplicaron las restricciones se muestran en las figuras siguientes:

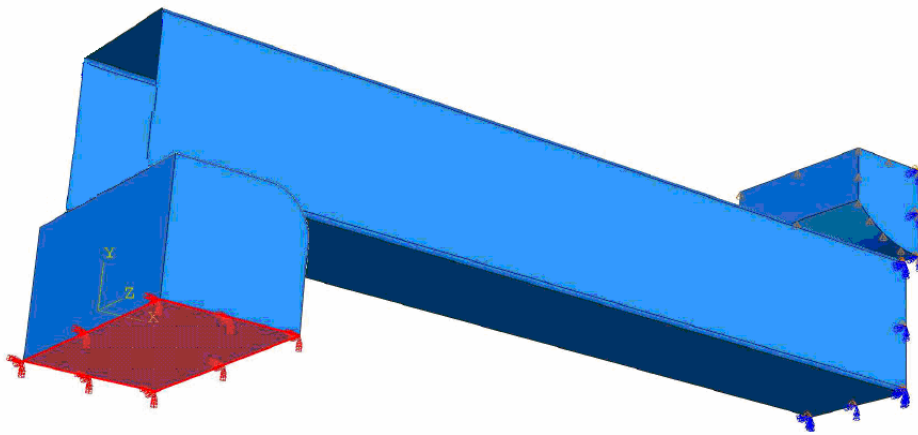


Fig. 67: Fijación de apoyo

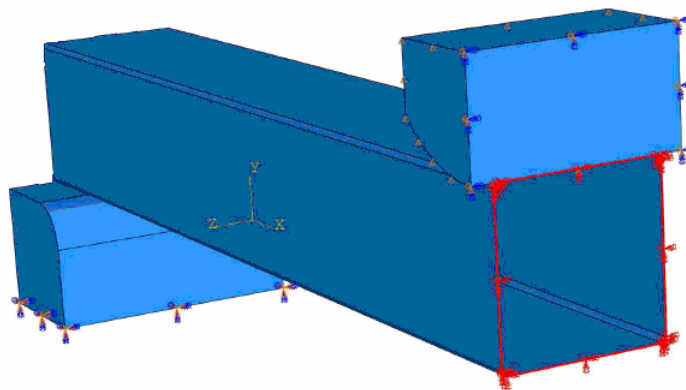


Fig. 68: Restricción debida a la simetría aplicada a la mitad de la viga

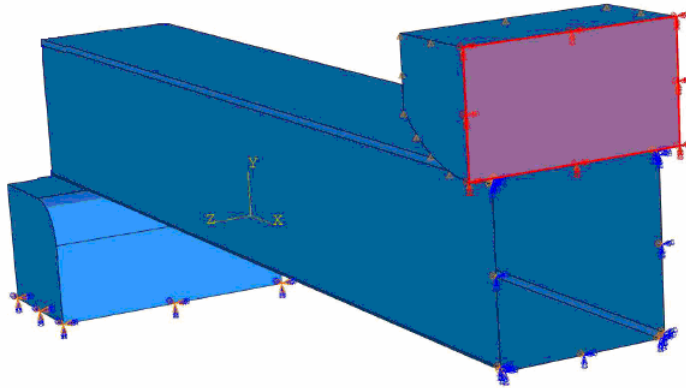


Fig. 69: Restricción debida a la simetría aplicada a la mitad del percutor

Condiciones de contorno de viga doble simetría

Al igual que con una simetría, en el caso de doble simetría, se aplica a la cara por la que se corta y consiste en obligar a que el desplazamiento en la dirección perpendicular a la cara sea cero. Además, el giro en torno a los otros dos ejes debe ser también cero. La explicación es que hay que obligar a que sean nulos los desplazamientos que, si se usara el modelo completo, serían cero. Las caras a las que se les aplicaron las restricciones se muestran en las figuras siguientes:

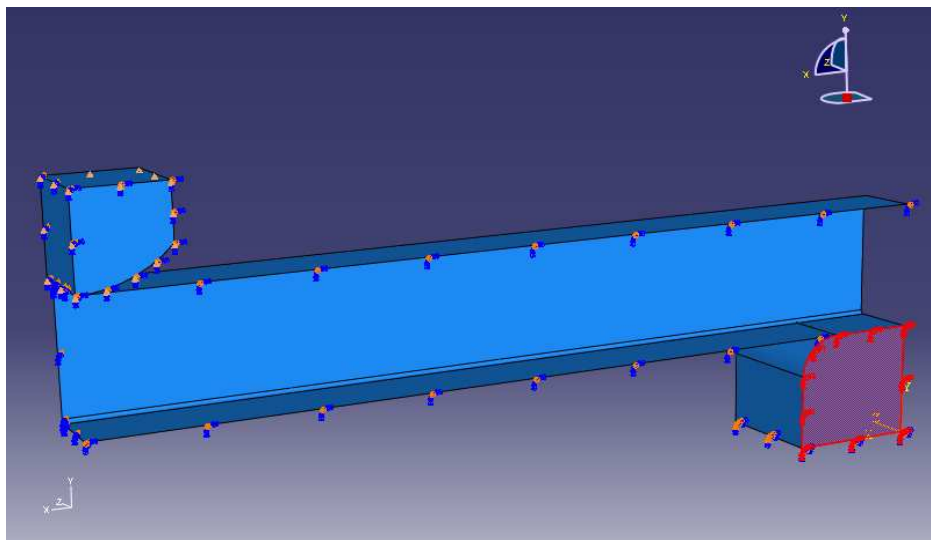


Fig. 70: Restricción debida a la simetría aplicada a los apoyos

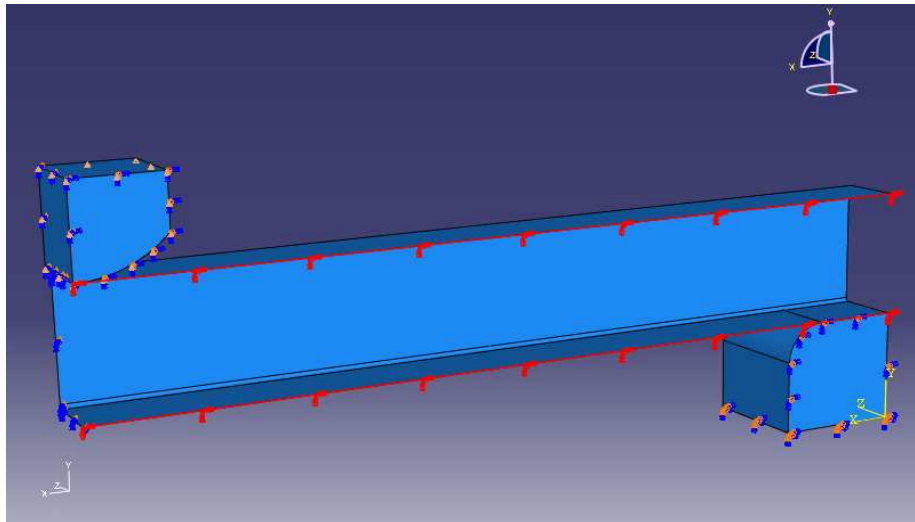


Fig. 71: Restricción debida a la simetría aplicada a la anchura de la viga

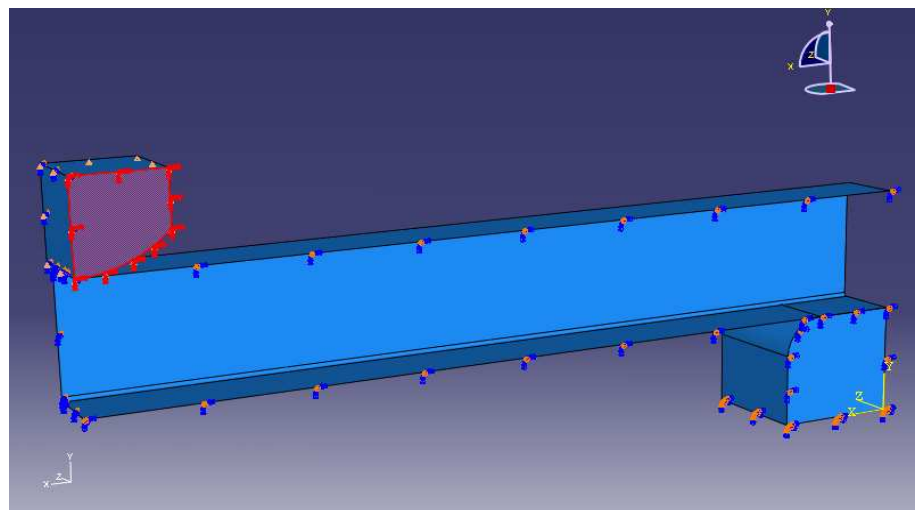


Fig. 72: Restricción debida a la simetría aplicada al percutor

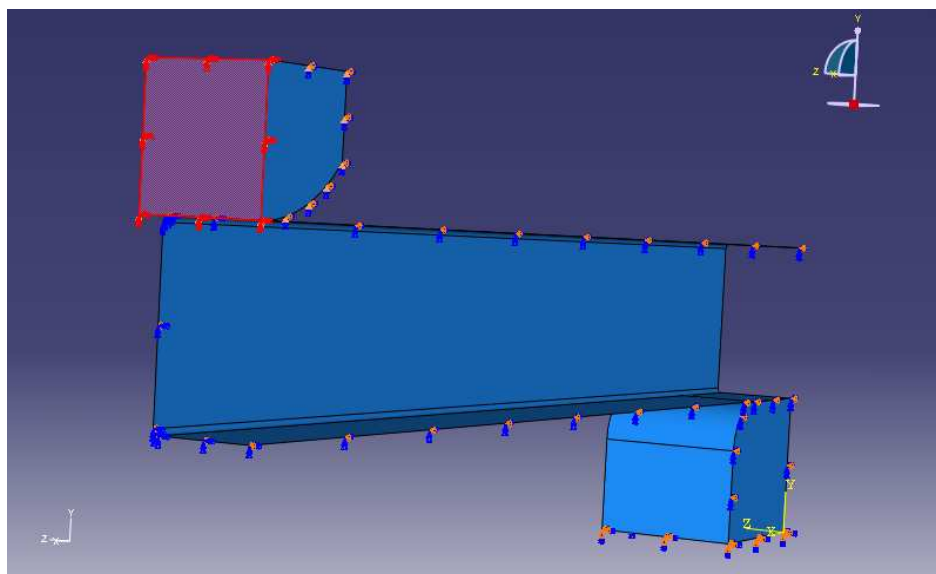


Fig. 73: Restricción debida a la simetría aplicada a la mitad del percutor

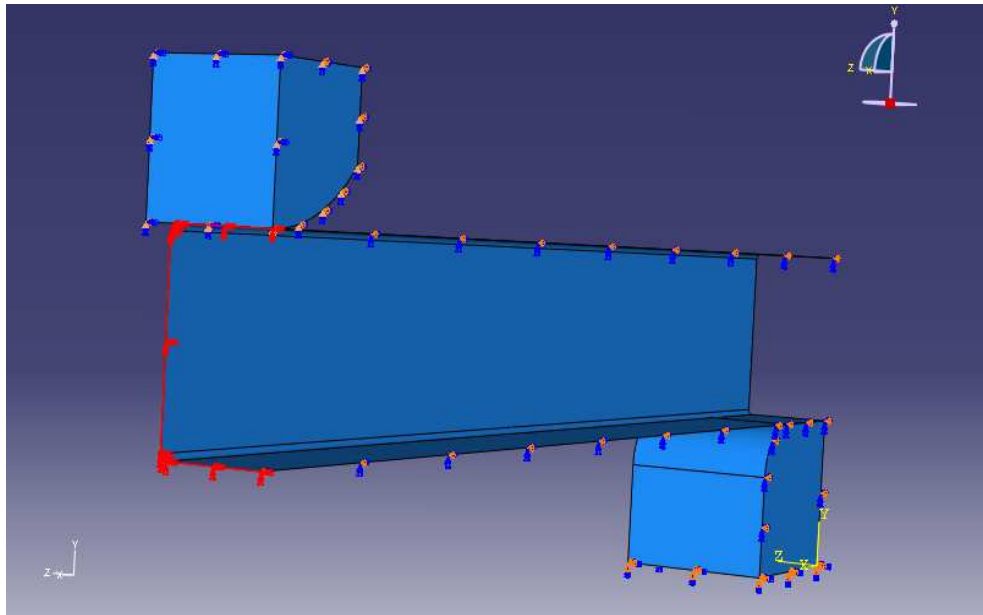


Fig. 74: Restricción debida a la simetría aplicada a la mitad de la viga

Otra condición de contorno necesaria es la que obliga a que el apoyo no se mueva. Para esto se impide el desplazamiento en cualquier dirección a toda la cara de la base.

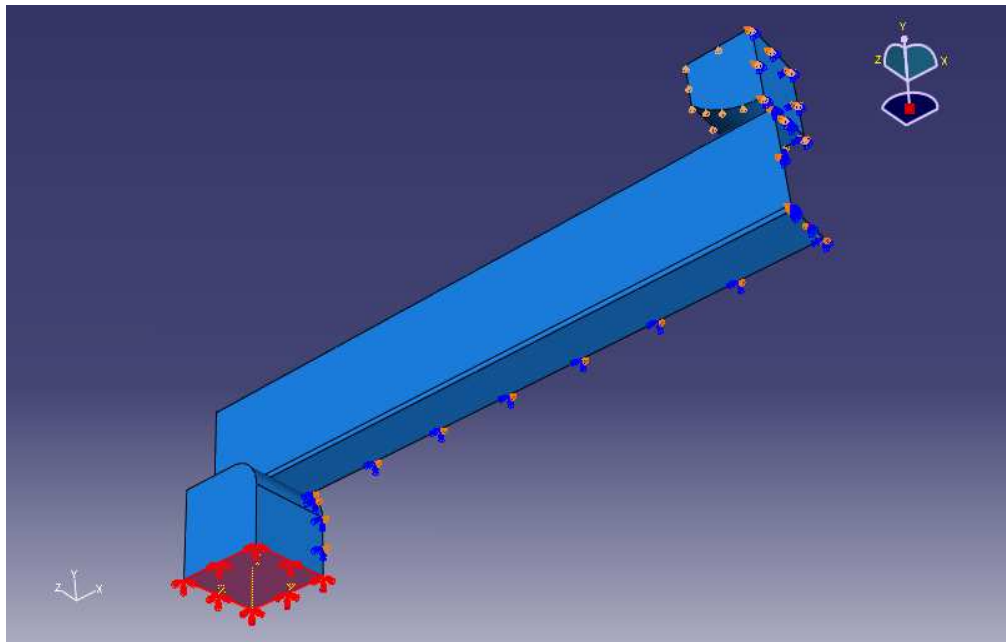


Fig. 75: Restricción del empotramiento del apoyo.

3.2.5. Mallado

Mallado de percutor entero

Para el mallado del percutor es necesario tener en cuenta que no importa demasiado poner pocos nodos ya que el único valor que se necesita es el desplazamiento y velocidad del percutor total. Se usarán elementos hexagonales y lineales porque son los que mejor se adaptan a superficies curvas. Son del tipo C3D8R de ABAQUS/ EXPLICIT ya que cada elemento consta de cuatro nodos. Son nodos de integración reducida. El percutor queda como aparece en la siguiente figura:

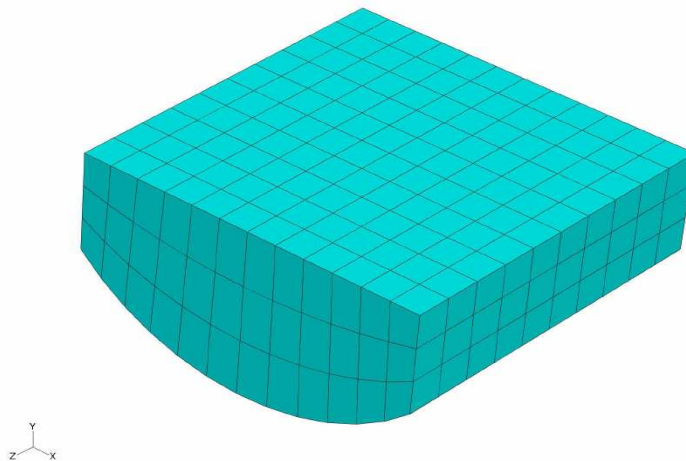


Fig. 76: Mallado de percutor

Mallado de percutor con una simetría

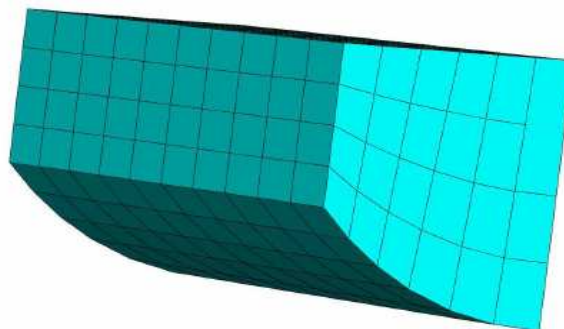


Fig. 77: Mallado de medio percutor

Mallado de percutor con dos simetría

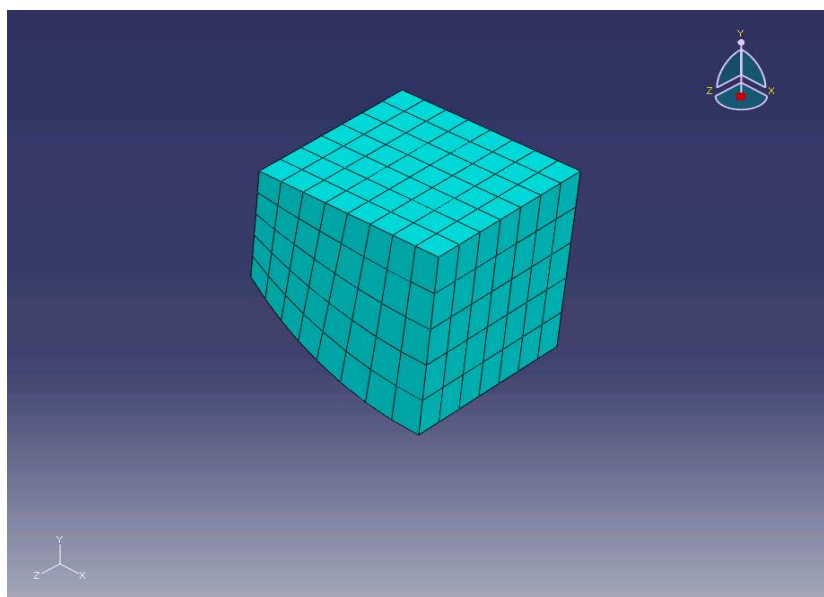


Fig. 78: Mallado de un cuarto de percutor

Mallado de probeta entera

En este apartado, se expondrá solamente dos modelos correspondientes al mallado inicial (poco afinado) y el mallado final (más afinado). La selección del mallado requiere de un compromiso entre número de elementos que componen la malla, y el tiempo total de simulación empleado por el sistema.

A lo largo de la viga se diferencias claramente dos zonas, las cuales responden a que en el centro de la viga, se registra el mayor momento flector del ensayo, lo cual implica elevadas tensiones y en la zona de los apoyos se debe tener en cuenta el efecto de las reacciones de los apoyos sobre la probeta. Las tres zonas malladas son:

- Zona central y extremos, con igual mallado
- Zona intermedia entre las anteriores, en el que el mallado es menos fino.

El mallado definitivo de la viga se realiza con elementos del tipo S4R de ABAQUS/EXPLICIT que son elementos lineales compuestos por cuatro nodos.

Resumen de número de nodos y elementos que componen los modelos de probeta ensayados:

	Modelo entero		Una simetría		Dos simetrías	
	Elementos	Nodos	Elementos	Nodos	Elementos	Nodos
Inicial	2323	2355	858	874	400	441
Final	24632	24671	8601	8628	12915	13144

Tabla 5: Relación entre número de elementos y modelos numéricos

Se realizaron varios modelos con mallados diferentes, de los cuales solo se presentan un mallado inicial y otro final para los tres casos, y se presenta un caso intermedio para el mallado con doble simetría, del cual se hace un estudio mas detallado. El mallado de la viga se muestra en la siguiente figura:

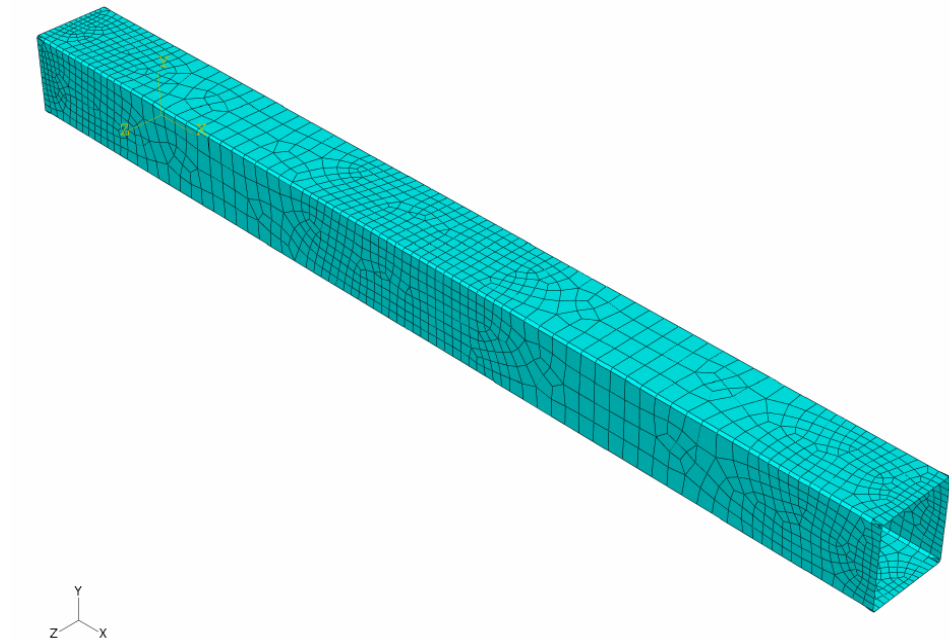


Fig. 79: Mallado inicial de la probeta

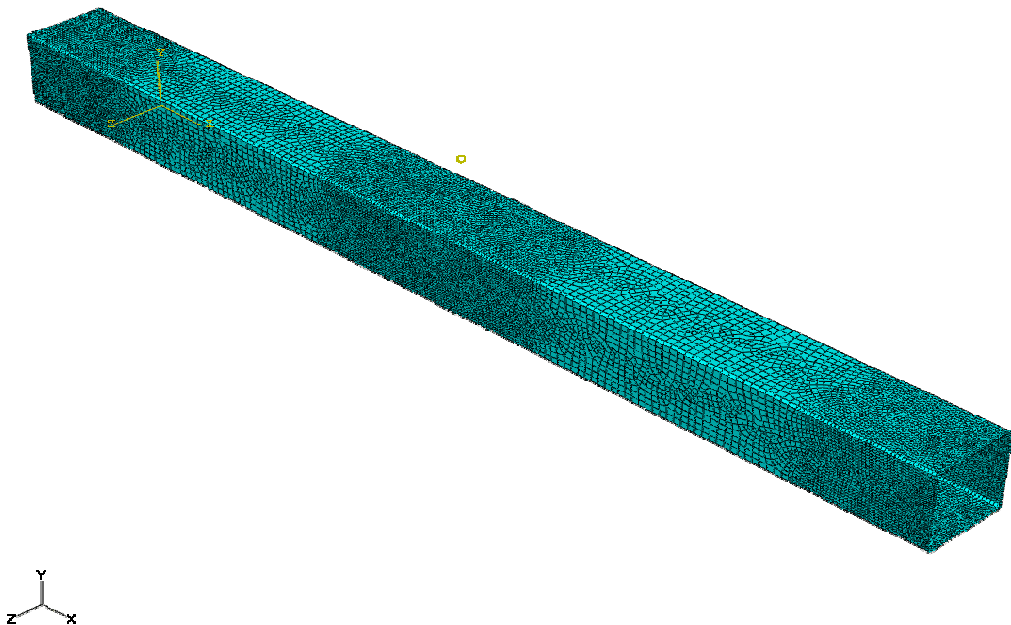


Fig. 80: Mallado último de probeta

Una de las dificultades del mallado de la probeta entera, fue que requerían muchos nodos en cada remallado para afinar el mallado. En la figura 80 se observa que los extremos de la probeta y el centro de la misma, presenta mas elementos aunque las zonas

de transición, entre las zonas densamente malladas y las poco malladas, es arbitraria debido a que el programa tiene que unir los nodos generados, los cuales son muchos en los extremos y centro de la probeta y pocos en el resto.

Mallado de media probeta

En este caso, también se puede observar que entre los extremos y el centro de la probeta, hay una zona de transición arbitraria, que se produce porque el programa une los nodos generados, el número de los cuales es mayor en los extremos que en el centro del modelo de probeta.

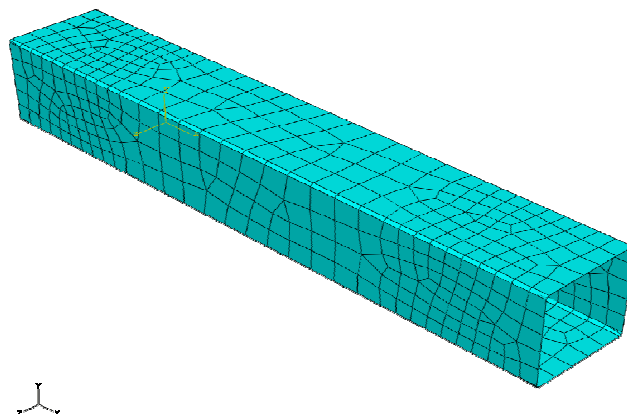


Fig. 81: Mallado inicial de viga con una simetría

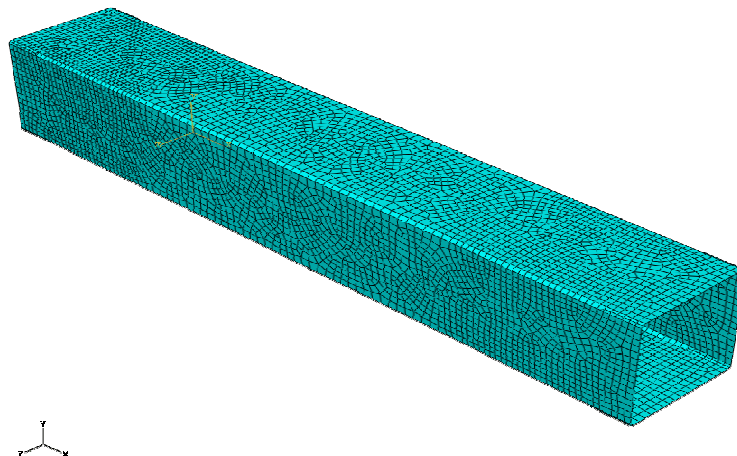


Fig. 82 Mallado último de viga con simetría

Mallado de un cuarto de probeta

El mallado de esta un cuarto de probeta, se realizó siguiendo los mismos criterios aplicados en el caso anterior, con la ventaja de que las dimensiones finales de este modelo eran la mitad que las del modelo anterior. En este caso, también se procedió a generar nodos en los radios de acuerdo de la probeta.

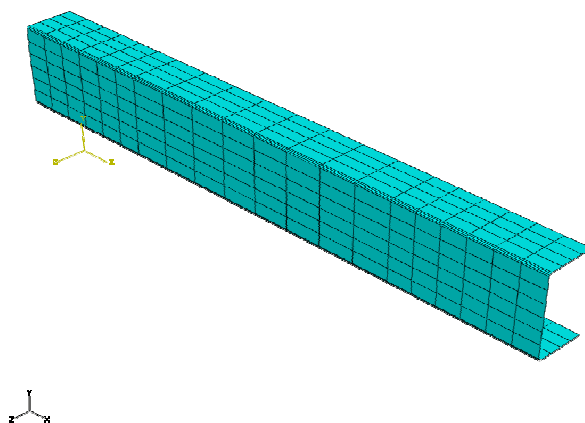


Fig. 83: Mallado inicial de viga con doble simetría

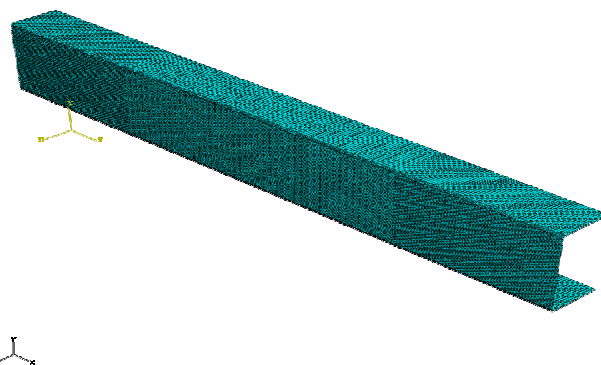


Fig. 84: Mallado último de viga con doble simetría

En la figura siguiente se presenta uno de los mallados de probeta intermedios, generados en el proceso de mallado. En este modelo se aprecia con claridad las zonas de mallado denso en los extremos de la probeta y la zona central poco mallada, cuya justificación es idéntica a la especificada para el caso de viga entera.

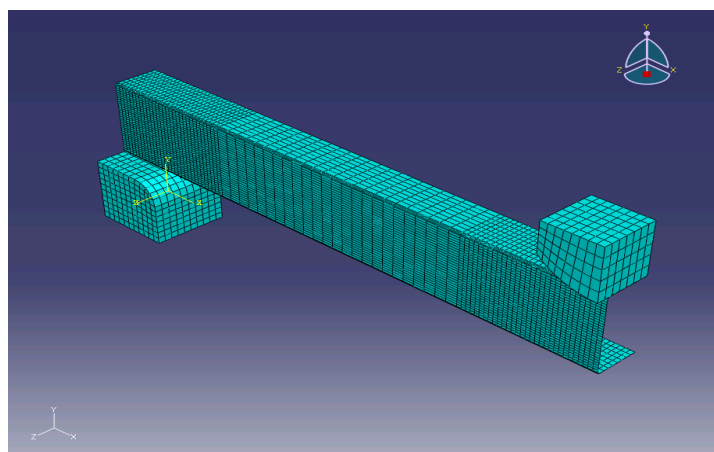


Fig. 85: Mallado de modelo entero

Análisis de sensibilidad de mallado

Para elegir el mallado final de la probeta, es necesario realizar varias pruebas. Se utilizó un mallado cada vez más fino hasta llegar a un tamaño de los elementos para el cual la mejora que se obtenía en el resultado, al hacerlos más pequeños, no compensaba el aumento de tiempo de cálculo.

Al inicio de las simulaciones se utilizó un tiempo de 3 ms pero dado que resultaba insuficiente porque había información sin reflejar, se paso a un tiempo de 12ms, con el cual se obtenía información del ensayo de forma completa.

Se ha tomado como criterio de decisión, para la selección del mallado adecuado, la evolución del desplazamiento vertical de los nodos centrales de la viga, cuando se la somete a una carga con el percutor a una velocidad de 2.5 m/s durante un tiempo de 12ms.

A continuación se presenta una tabla resumen de los tiempos empleados para la simulación para cada modelo y haciendo un análisis para un mallado poco fino, otro intermedio y otro muy afinado.

De antemano se puede intuir que el modelo entero será el que mayores tiempos de simulación requerirá para conseguir unos resultados estables, en comparación con los modelos que emplean simetría. De este análisis se puede concluir la necesidad de emplear modelos sencillos y simétricos, de cara a conseguir un adecuado equilibrio entre resultados obtenidos y tiempo de simulación empleado.

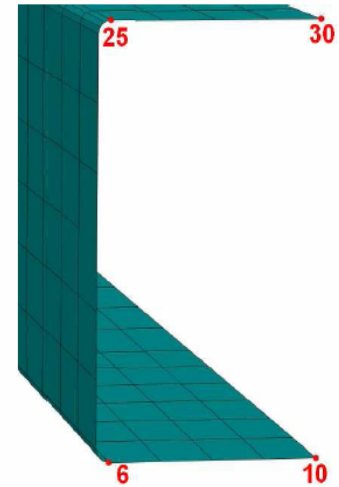
	Tiempo simulación		
	Modelo entero	Modelo una simetría	Modelo dos simetrías
Inicial	45 min	30 min	15 min
Final	4 días	1 día	18 horas

Tabla 6: Tabla resumen de tiempos de simulación de los tres modelos

A la vista de la tabla anterior, vamos a realizar un análisis mas detallado del modelo que emplea doble simetría, ya que es el que menores tiempo de simulación nos ofrece.

El método seguido para la selección del mallado definitivo de la viga, consistió en la obtención de los desplazamientos verticales (U2) de los nodos centrales de la viga en función del número total de nodos del modelo. Una vez obtenidos estos valores, se realizaba una media aritmética con dichos valores, consiguiendo el valor “Promedio neto”, que se puede ver en la figura 86.

Tiempo ms	U2_N25	U2_N30	U2_N10	U2_N6
0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
0,00060003	0,00149756	0,00161838	0,00136768	0,00143651
0,00120004	0,00299965	0,00321046	0,00282372	0,00291785
0,00180003	0,00450001	0,00486574	0,00419051	0,00434564
0,00240004	0,00600328	0,00647403	0,00562854	0,00582564
0,00300000	0,00750958	0,00818427	0,00700461	0,00725395
0,00360003	0,00901664	0,00984442	0,00841856	0,00872181
0,00420000	0,01052276	0,01161782	0,00975820	0,01014700
0,00480002	0,01201886	0,01329652	0,01112230	0,01159580
0,00540004	0,01352436	0,01504172	0,01245640	0,01303370
0,00600002	0,01503186	0,01675862	0,01379030	0,01447930
0,00660001	0,01655206	0,01857352	0,01510460	0,01590500
0,00720001	0,01807396	0,02037192	0,01641950	0,01732270
0,00780001	0,01959736	0,02216712	0,01767550	0,01871760
0,00840002	0,02112176	0,02396552	0,01887940	0,02007370
0,00900001	0,02264666	0,02572822	0,02010860	0,02143320
0,00960003	0,02416956	0,02744282	0,02133990	0,02278770
0,01020000	0,02569516	0,02917172	0,02248810	0,02408140
0,01080000	0,02721986	0,03089112	0,02358050	0,02533710
0,01140000	0,02876536	0,03257712	0,02472270	0,02661930
0,01200000	0,03030996	0,03424562	0,02586190	0,02789240



Promedio neto	0,02957747
Nº elementos activos	400
Nº nodos activos	441

Fig. 86: Ejemplo de método seguido para obtención de resultados en Abaqus

De los resultados obtenidos, se puede observar que la gráfica de la figura 87 tiende a estabilizarse a partir de los 4500 elementos, por lo que se optó por elegir el mallado M9 (ver tabla 7), el cual contiene 4536 elementos, que es un valor próximo a los 4500 nodos, en los cuales el modelo tiene un comportamiento estable. Se ha elegido este valor teniendo en cuenta la duración de las simulaciones, ya que estando cerca del límite inferior de nodos estables, el tiempo de simulación será menor que para el resto de casos. Este tiempo de simulación, se reduce a 2 horas.

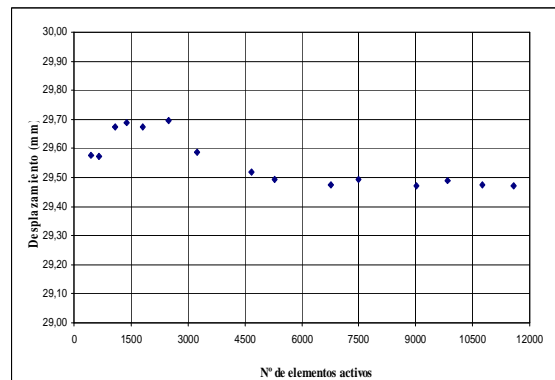


Fig. 87: Evolución del desplazamiento de centro de viga respecto a diferentes modelos mallados

Gráfica a t=12ms		
Nº elementos activos	Desplazamiento (mm)	
400	29,58	M1
598	29,57	M2
1008	29,68	M3
1302	29,69	M4
1728	29,67	M5
2378	29,69	M6
3128	29,59	M7
3626	29,7	M8
4536	29,52	M9
5130	29,49	M10
6600	29,48	M11
7314	29,49	M12
8816	29,44	M13
9638	29,49	M14
10545	29,55	M15
11352	29,47	M16

Tabla 7: Número de nodos en función de desplazamiento de centro de viga

Finalmente, de este análisis de sensibilidad, se concluyen dos cosas:

- El modelo elegido para desarrollar las simulaciones finales, es el modelo que emplea dos simetrías
- Dentro de este modelo de dos simetrías, el modelo elegido es el llamado M9, el cual contiene 4536 elementos y emplea 2 horas en completar la simulación.

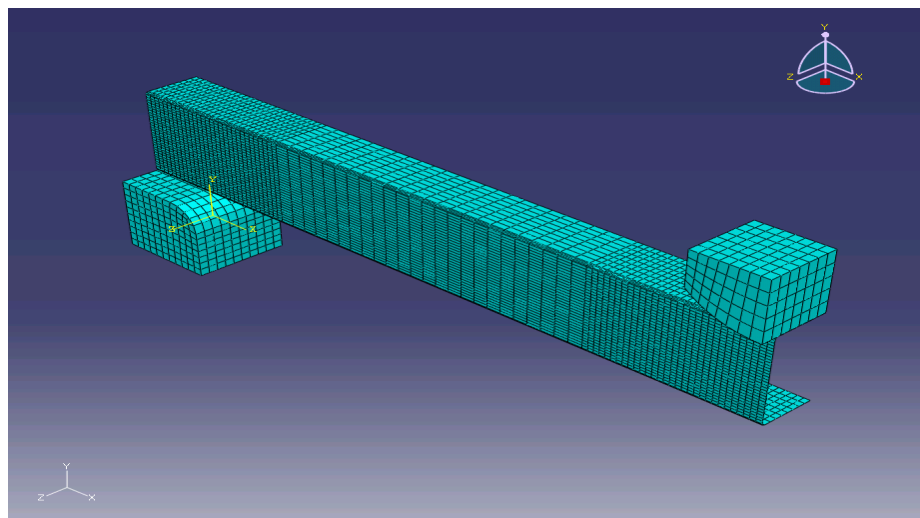


Fig. 88: Modelo elegido para analizar.

Capítulo 4

Validación y Resultados

En este apartado se presentan los resultados de las simulaciones llevadas a cabo con el software Abaqus. Se han llevado a cabo simulaciones en las que se han podido modificar tres variables diferentes: velocidades de impacto, el lado de la sección de la viga cuadrada y el espesor de la viga. Todos estos ensayos se han realizado con la intención de obtener un modelo que permita validar el modelo elegido y la aplicabilidad del criterio de Hashin implementado en ABAQUS. Dicha validación se realizó mediante la comparación de las gráficas Fuerza-tiempo tanto de los resultados experimentales como de los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas.

Las gráficas que se presentarán a continuación serán:

1. Fuerza-tiempo
2. Fuerza máxima- Energía de impacto
3. Desplazamiento vertical (U2)- Energía de impacto

4.1. Validación

La siguiente representación, compara el caso de un ensayo en Abaqus con velocidad 3.5m/s con el ensayo realizado a la misma velocidad en la Torre de Caída. En la esa representación de los resultados de Torre de Caída, se emplea una aproximación con media móvil de periodo 85, para el suavizado de la curva, obtenida mediante el programa Excel.

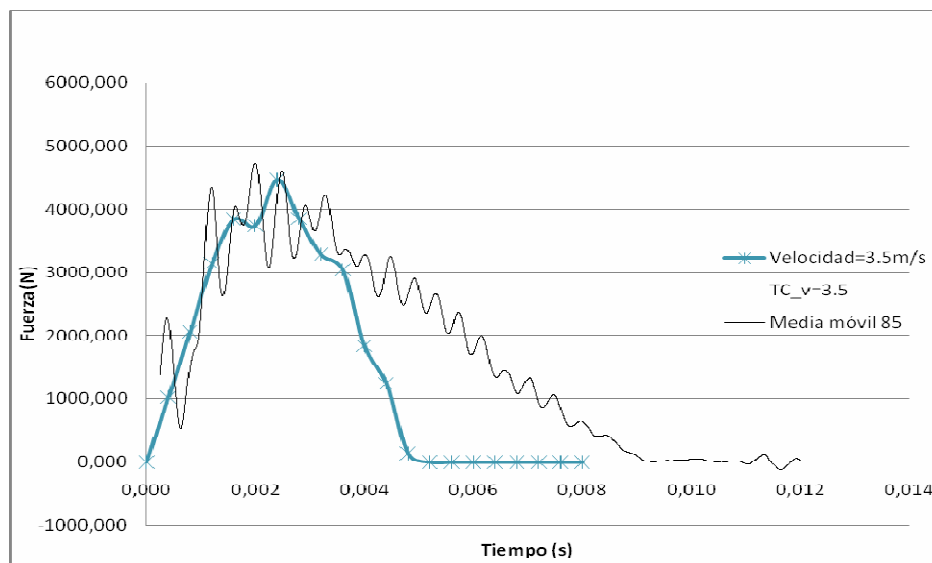


Fig. 89: Representación comparativa entre resultados de Abaqus y resultados experimentales, con línea de tendencia.

En esta representación se puede observar que durante el tramo inicial, hasta los 3 milisegundos, aproximadamente, ambas gráficas tienen una tendencia ascendente similar. Pero a partir de los 3 milisegundos, se observa que la gráfica Abaqus desciende a mayor velocidad que la gráfica experimental. Se puede comprobar que la fuerza final obtenida es próxima a la fuerza obtenida en los ensayos experimentales, aunque el tiempo de simulación total sea diferente. De esta figura 89 se puede considerar que el modelo numérico valida la fuerza máxima alcanzada en los ensayos con torre de caída.

Debido a que los elementos tipo Shell no tienen mallado en las tres dimensiones, (como los casos de sólidos deformables), parece ser que cuando se produce el fallo del elemento por alguna zona de la probeta, se produce un fallo en cadena de todos los elementos que le rodean, dando lugar a valores de Fuerza que no se corresponden con los obtenidos en los ensayos de torres de caída. Del mismo modo, hay otras variables como el desplazamiento y energía absorbida, que no se pueden obtener debido a esta causa.

4.2. Resultados

Para realizar estas simulaciones, se ha partido de una probeta base de 35mm de lado y espesor de 2.5mm. A continuación se muestran los resultados Fuerza-tiempo obtenidos en las simulaciones llevadas a cabo con Abaqus.

4.2.1. Influencia de la velocidad de simulación

En la gráfica de la figura 90 se muestra la evolución de la fuerza respecto del tiempo que dura la simulación. Se puede apreciar que tienen una forma muy parecida entre ellas, variando en función de la energía de impacto, la cual viene dada por la velocidad de impacto.

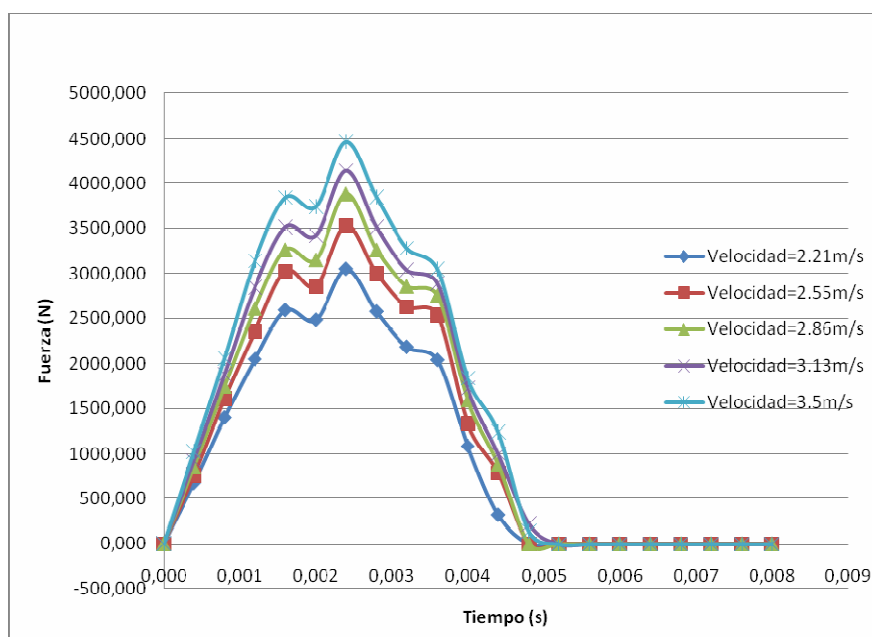


Fig. 90: Representación de Fuerza-tiempo de simulaciones de velocidad variable.

Una vez graficado las variables Fuerza-tiempo, la siguiente gráfica corresponde a las fuerzas máximas obtenidas para cada energía de impacto. La energía de impacto viene dada por la expresión:

$$E_{\text{impacto}} = \frac{1}{2}mv_{\text{impacto}}^2$$

Ecuación 4. 1

Velocidad	Energía impacto
1,8	9,93
2	12,26
2,21	14,96
2,55	19,92
2,86	25,06
3,13	30,02
3,5	37,53

Tabla 8: Velocidades y energías de impacto

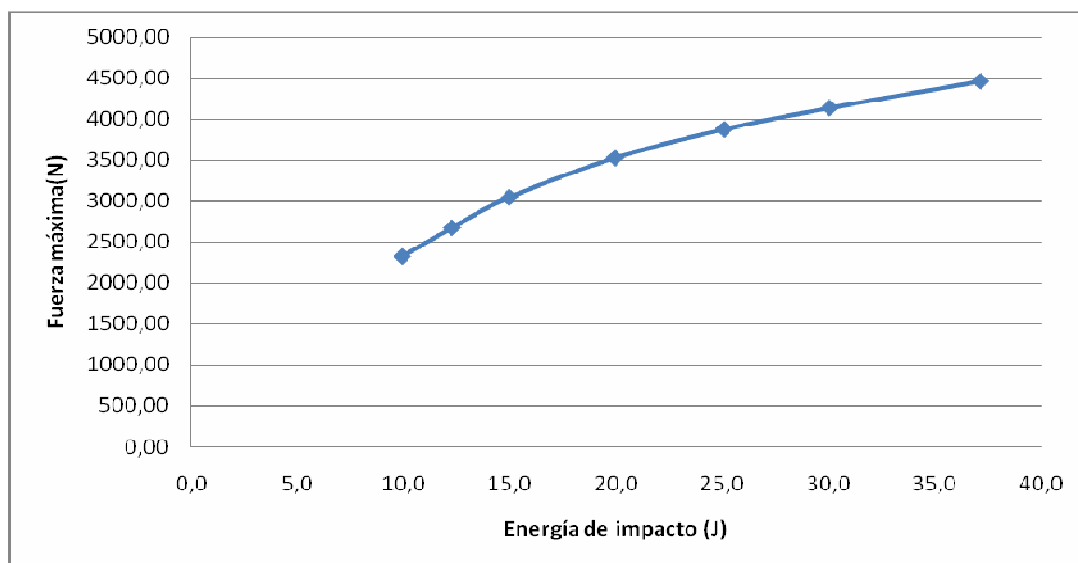


Fig. 91: Representación de Fuerza máxima- Energía de impacto.

Esta evolución de la gráfica indica una relación creciente entre fuerza máxima y energía de impacto en las simulaciones llevadas a cabo mediante Abaqus. Resulta difícil obtener una gráfica similar con los datos experimentales, debido a que esos valores presentan muchos valores que pueden ser considerados ruido, obtenido al realizar el ensayo en torre de caída (ver figura 92).

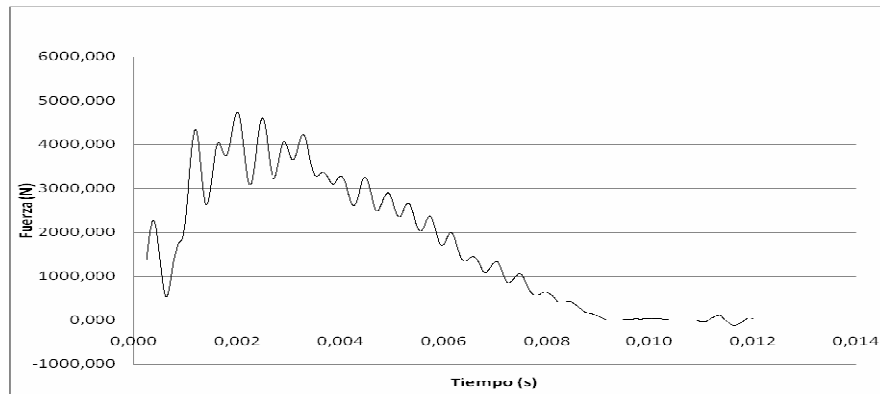


Fig. 92: Representación Fuerza-Tiempo de un ensayo de torre de caída con ruido.

Otra resultado interesante que se puede incluir (ver figura 94) es la evolución del desplazamiento vertical de los nodos superiores con relación a los nodos inferiores. En esta gráfica también se incluye el caso teórico obtenido mediante la teoría de resistencia de materiales. Su único objetivo es el comparativo, ya que se tratan de simulación en regímenes diferentes, dinámico vs estático y simulación numérica vs teoría de resistencia de materiales.

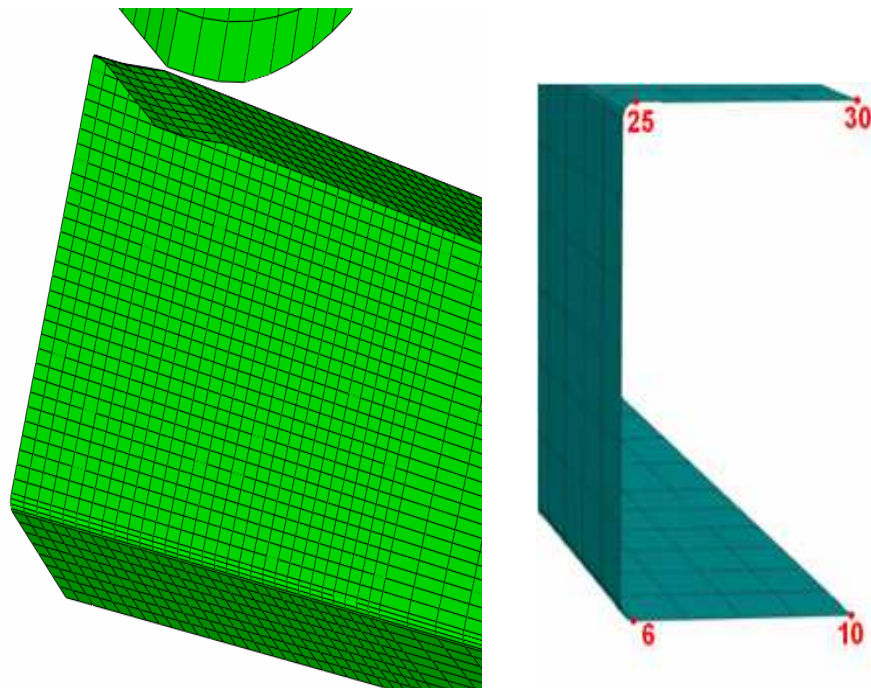


Fig. 93: Detalle de zona superior de viga y nodos tomados seleccionados para medir el desplazamiento vertical

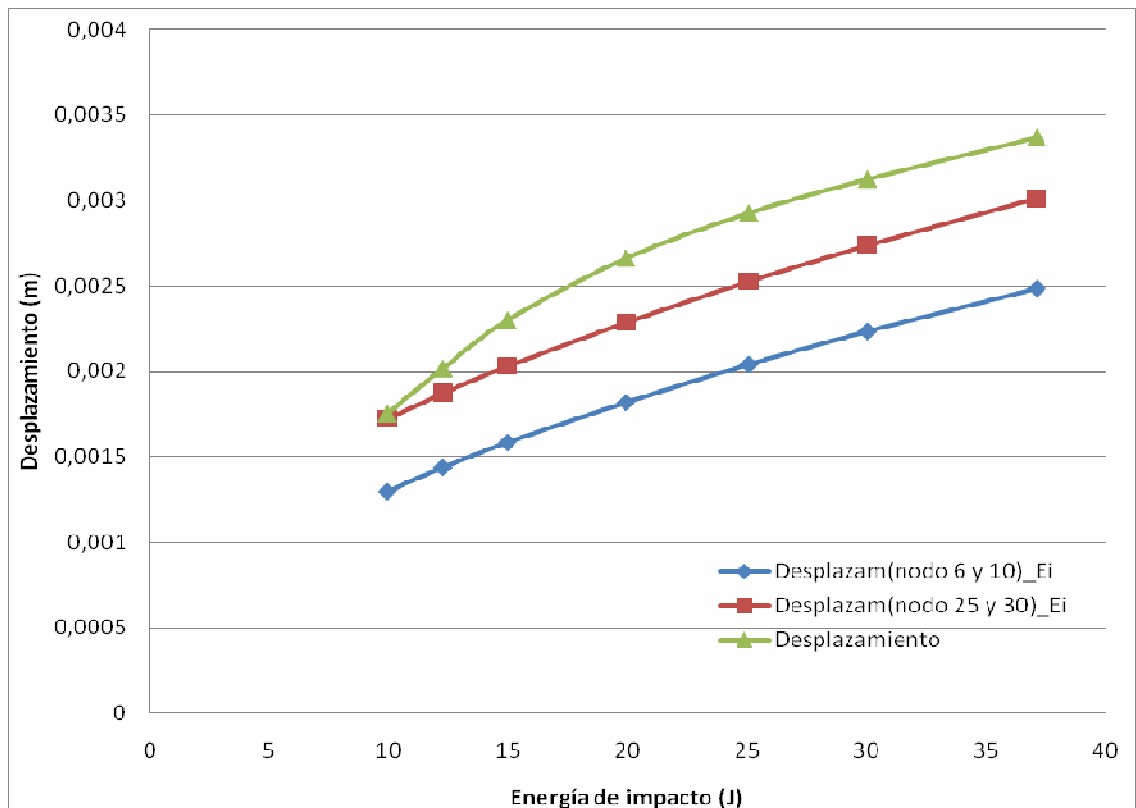


Fig. 94: Evolución del desplazamiento vertical de nodos superiores e inferiores comparado con el caso teorico de resistencia de materiales

4.2.2. Influencia del espesor de la viga

A continuación se muestran las gráficas Fuerza-tiempo, para vigas en las que se ha modificado el espesor entre los siguientes valores: 2,2; 2,4; 2,6; 2,8 y 3,0 mm. Se procedió a fijar la variable velocidad con un valor de 3.5 m/s y el lado (canto de la viga-probeta) con un valor de $L=30\text{mm}$.

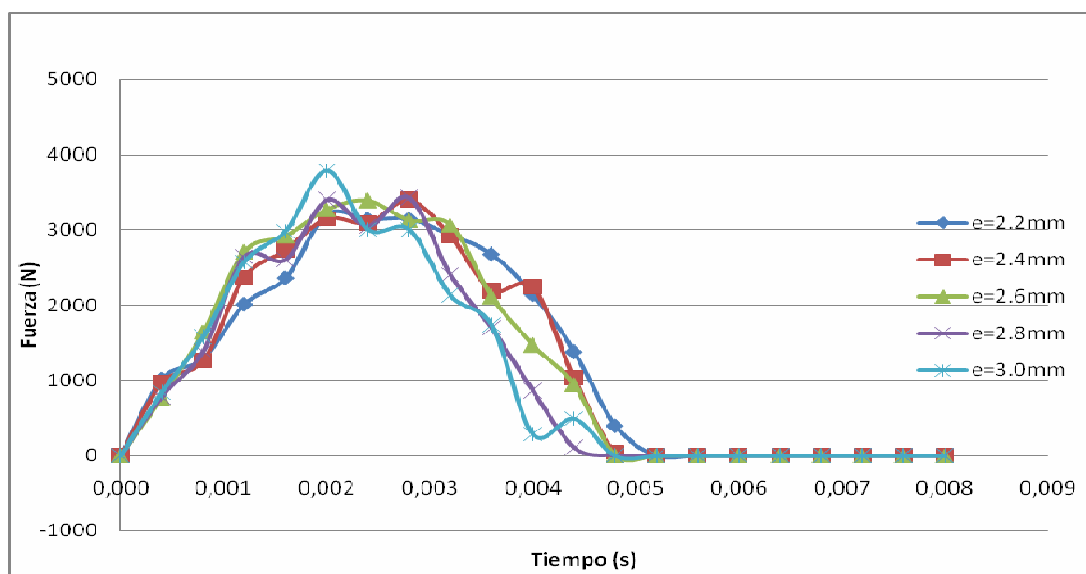


Fig. 95: Representación de Fuerza-tiempo con superposición de gráfica experimental de $v=3.5\text{m/s}$

En la figura anterior se puede observar que hasta 2.5 milisegundos, todos los modelos tienen una tendencia creciente pero a partir de 2.5 milisegundos, se observa que las probetas con mayor espesor, tienen un descenso mas acusado en comparación con los de menor espesor. También se puede observar que los registros de fuerza aumentan a medida que aumenta el espesor de la viga.

Para este caso, también se muestra una gráfica donde se relaciona el espesor de las vigas con la fuerza máxima alcanzada. Estos valores se obtuvieron fijando las siguientes variables:

Velocidad $v=2.86\text{m/s}$

Lado $L=35\text{mm}$

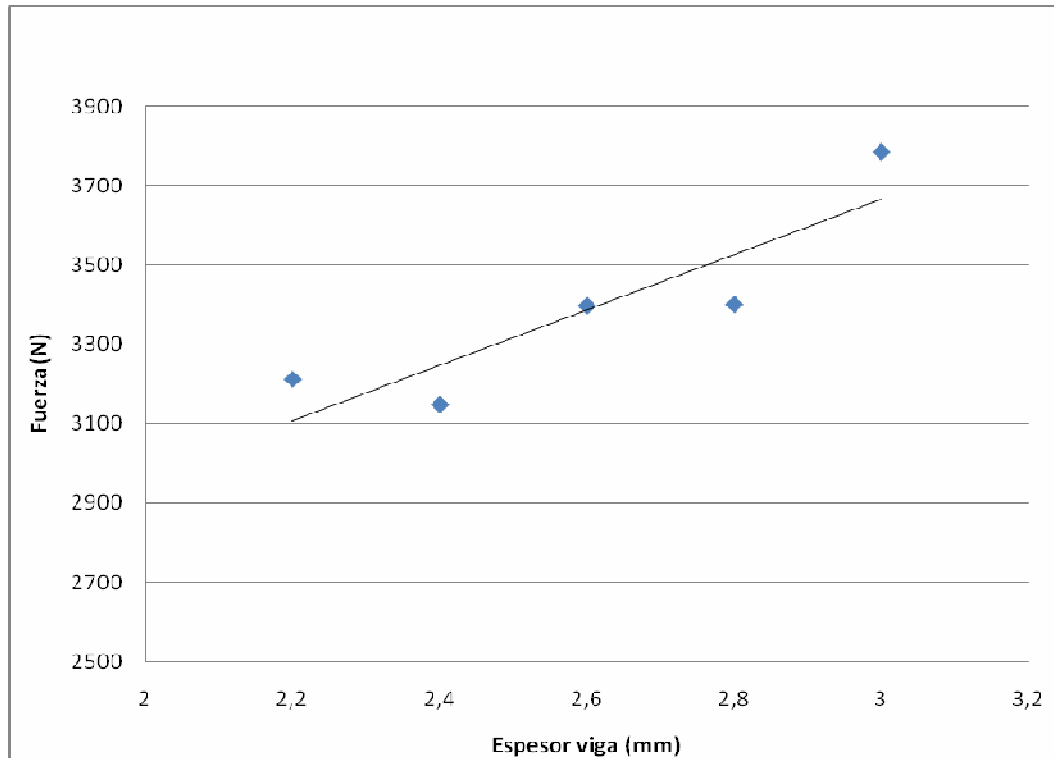


Fig. 96: Representación de Fuerza máxima-espesor de viga.

Todas las gráficas elaboradas a partir de los datos obtenidos con las simulaciones numéricas, presentan una tendencia similar a la de los resultados experimentales. Sin embargo, a medida que transcurre la simulación, se produce un fallo en el modelo que hace que los resultados finales obtenidos, se distancien de los resultados experimentales.

Como se puede leer en uno de los trabajos referenciados, a medida que el espesor de las muestras aumenta, se espera que que aumente el desplazamiento y la carga equivalente [4].

4.2.3. Influencia del tamaño de la sección de la viga

A continuación se muestran las gráficas Fuerza-tiempo, para tres vigas de diferente longitud de lado. Se procedió a fijar la variable espesor con un valor de 2.5mm. Se obtuvieron valores para dos velocidades diferentes: $v_1=2.55\text{m/s}$ y $v_2=3.5\text{m/s}$.

Viga de lado L=30mm
 Viga de lado L=33mm
 Viga de lado L=35mm

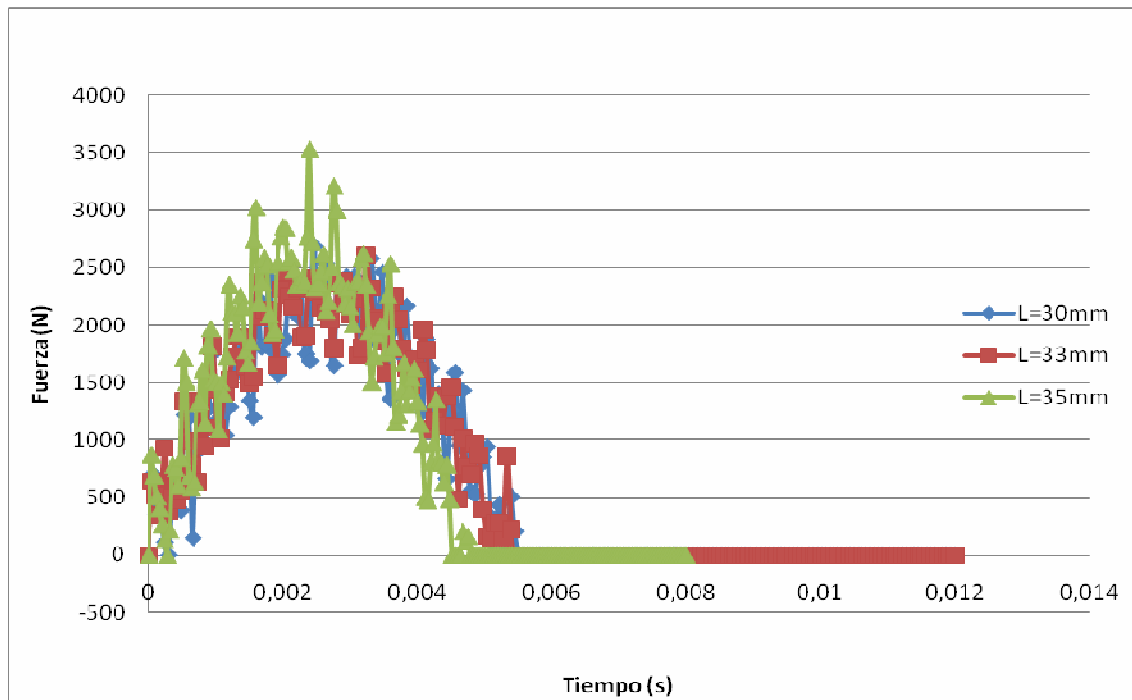


Fig. 97: Representación de Fuerza-tiempo de simulaciones de vigas de lado variable y velocidad 2.55m/s

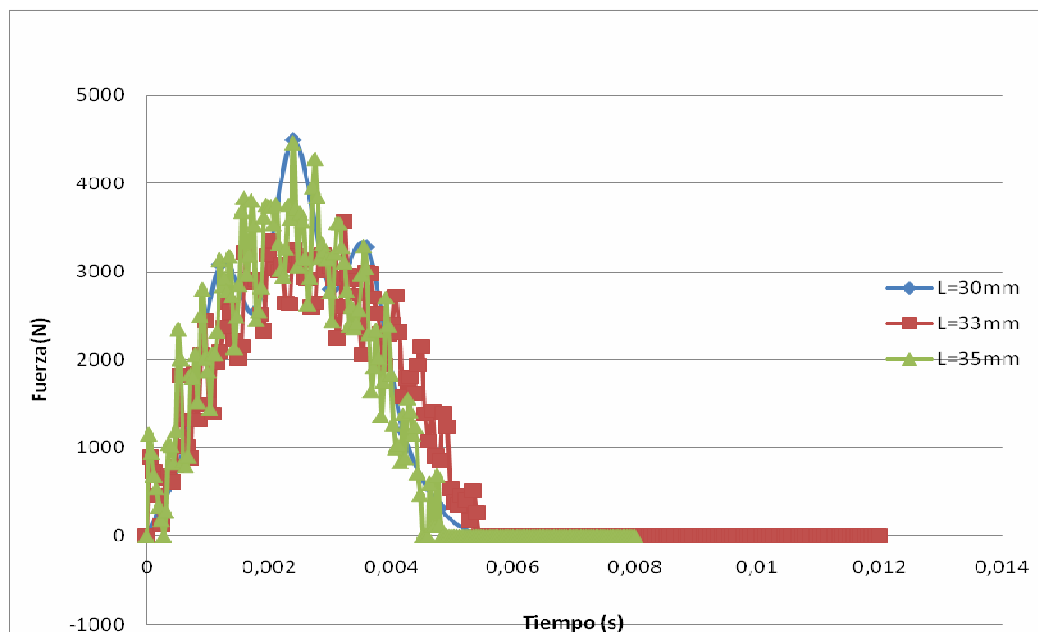


Fig. 98: Representación de Fuerza-tiempo de simulaciones de vigas de lado variable y velocidad 3.5m/s

Se puede observar que los resultados de las simulaciones con Abaqus, en cuanto a valores de fuerza, no presentan diferencias muy significativas, sin embargo si se aprecia que las vigas de lado 35 mm, finalizan antes que las otras vigas de lado 30 mm y 33 mm. En todos los casos, se puede observar que durante el tramo inicial, hasta un tiempo de 3 milisegundos, aproximadamente, sin embargo a partir de 3 milisegundos, se observa que la gráfica desciende a mayor velocidad a medida que aumenta el lado de las vigas.

A continuación se presenta una gráfica en la que se relaciona la Fuerza máx alcanzada entre la Energía de impacto utilizada. La energía de impacto se obtiene con la ecuación 4.1 del apartado anterior. Las velocidades que se utilizaron fueron: $v_1=2.55\text{m/s}$, $v_2=2.86\text{m/s}$ y $v_3=3.5\text{m/s}$.

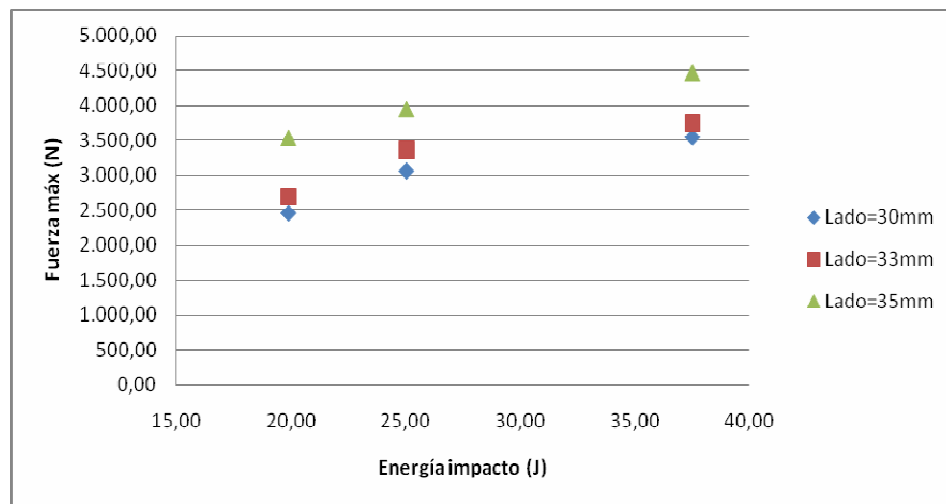


Fig. 99: Representación de Fuerza máx-Energía de impacto, con vigas de diferente longitud de lado.

De esta gráfica se puede observar que hay una tendencia ascendente de la fuerza a medida que el lado de la viga aumenta. De manera intuitiva, y aplicando conceptos de resistencia de materiales en régimen estático, al aumentar el lado de la viga, aumenta el momento de inercia, lo cual hace que las vigas presenten mayor resistencia al colapso en condiciones de flexión.

4.2.4. Modos de fallo de Hashin

Hay que tener en cuenta que el criterio de Hashin, tiene en cuenta 4 modos de fallo: fallo de fibras a tracción y compresión y fallo de matriz a tracción y compresión. Debido a que los elementos tipo Shell no tienen mallado en las tres dimensiones, (como los casos de sólidos deformables), parece ser que cuando se produce el fallo del elemento por alguna zona de la viga, se produce un fallo en cadena de todos los elementos que le rodean, dando lugar a valores que no se corresponden con los obtenidos en los ensayos de torres de caída.

MODO DE FALLO	TRACCION	COMPRESION
Fallo de la matriz	Fallo en tracción, $\sigma_{22} \geq 0$ $\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$	Fallo en compresión, $\sigma_{22} \leq 0$ $\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$
Fallo de la fibra	Fallo en tracción, $\sigma_{11} \geq 0$ $\sigma_{11} = X_T \quad (\sigma_{11}, X_T > 0)$	Fallo en compresión, $\sigma_{11} \leq 0$ $-\sigma_{11} = X_C \quad (\sigma_{11} < 0, X_C > 0)$

Fig. 100: Expresiones del criterio de Hashin 1973

A continuación se presentarán unos gráficos, en los que se reflejan como evolucionan los distintos modos del criterio de Hashin para cuatro de los nodos de la sección central de la viga. Estas gráficas están tomadas para una viga de las siguientes características:

Lado=35mm

Espesor=2.5mm

Velocidad=2.55m/s

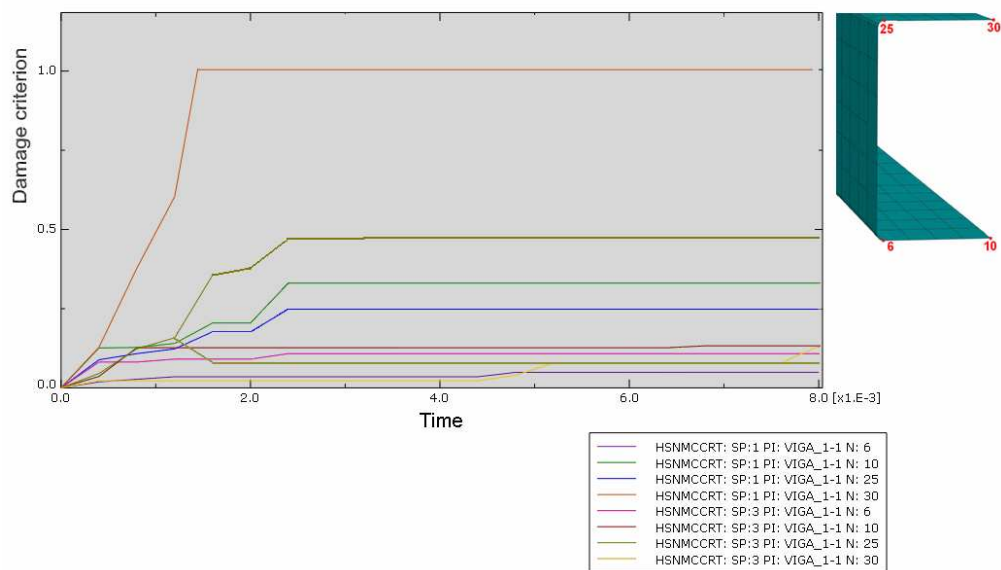


Fig. 101: Criterio de rotura por compresión de matriz

En la gráfica de la figura 101, se puede observar que el nodo 30 (cara superior de la viga), alcanza un valor unidad, lo cual indica que bajo este criterio, la viga colapsa. Esto tiene sentido debido a que el percutor cae con una velocidad sobre una area relativamente pequeña de la viga. El fenomeno que se presenta, concuerda con lo visto en la referencia [4], en la cual se aprecia una deformación mayor de la cara superior de la viga respecto de la cara inferior.

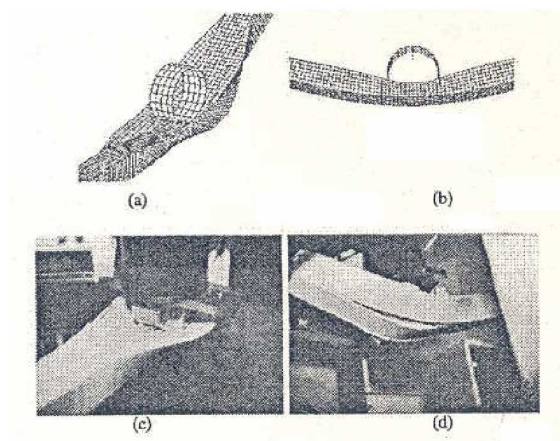


Fig. 102: Deformación progresiva en modelo numérico y caso real

En la misma figura 101, se puede observar que de cada nodo, Abaqus proporciona dos valores del criterio de Hashin, llamados SP1 y SP3; estos valores tienen que ver con una configuración inicial del programa, en el que se dejaba por defecto 3 puntos de integración en los cuales Abaqus aplica las ecuaciones del criterio de rotura de Hashin. En los elementos tipo shell, no hay un espesor real pero el programa permite asignar un espesor a lo largo del cual, se distribuyen los puntos de integración. En este caso, dejando por defecto los 3 puntos de integración del programa, se tendría en el espesor asignado, 3 nodos, siendo el nodo central, el correspondiente con el elemento shell y se tendrían otros dos nodos a ambos lados del nodo central (los cuales no se aprecian pero el programa los utiliza para hacer cálculos y de los cuales se obtienen resultados).

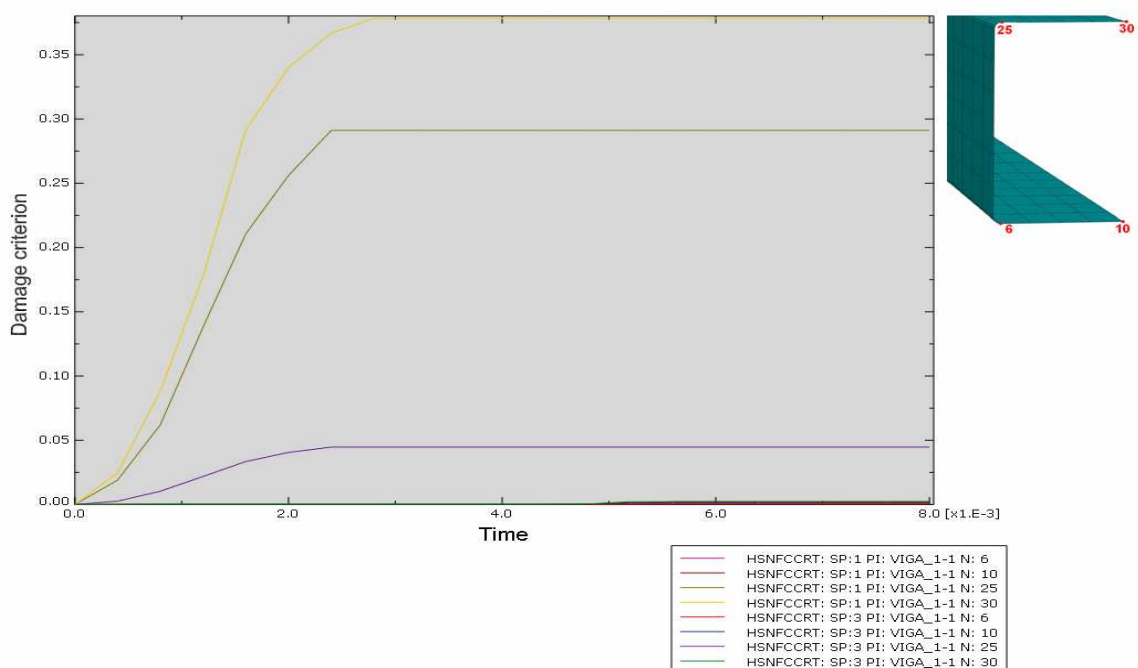


Fig. 103: Criterio de rotura por compresión de fibra

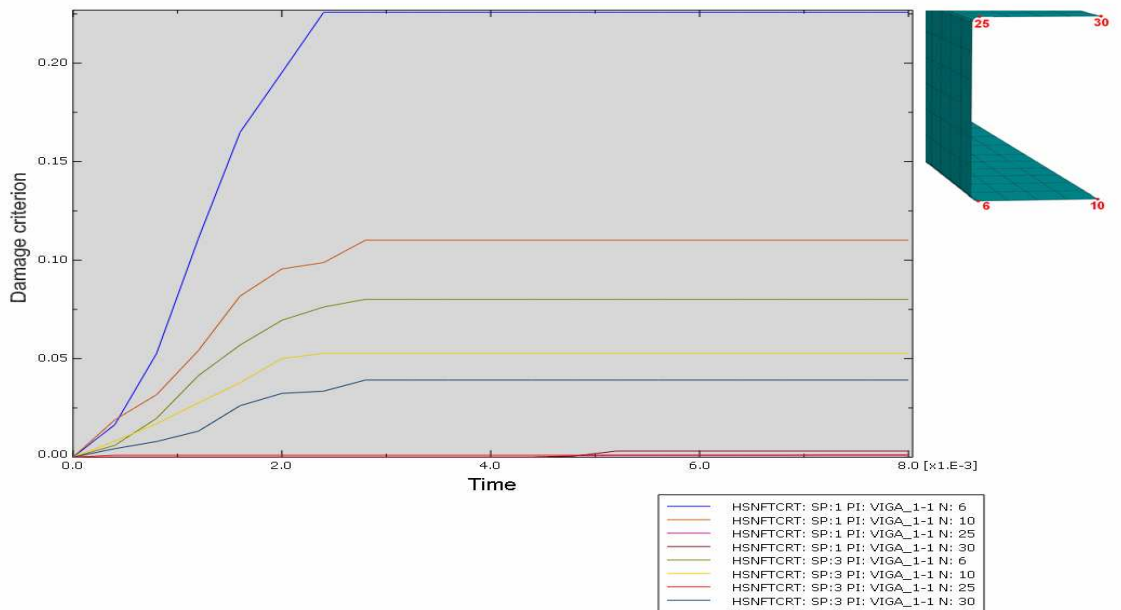


Fig. 104: Criterio de rotura por tracción de fibra

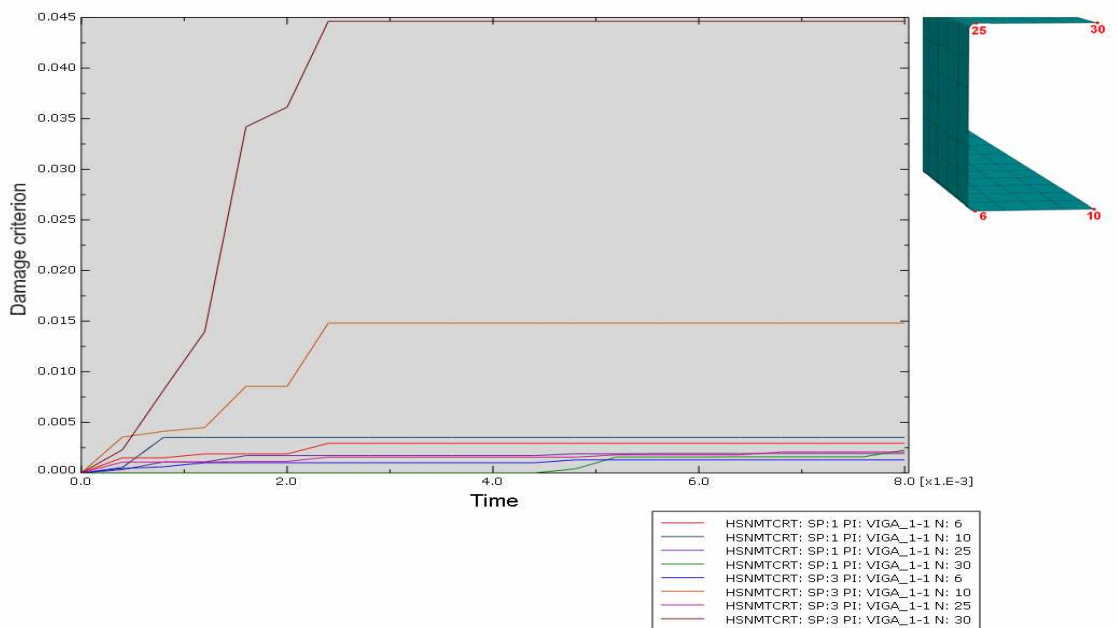


Fig. 105: Criterio de rotura por tracción de matriz

De las gráficas anteriores, se puede ver la evolución de los modos de fallo de los nodos centrales de la viga, fallo de compresión de fibra y tracción de fibra y matriz, y en ninguno de esos casos se supera el valor unidad que da lugar al colapso de la viga.

En la figura 106, se puede apreciar que se produce otra zona de elevadas tensiones. Esta zona se ubica en el área de contacto entre la viga y el apoyo. Estas tensiones en la viga, se pueden deber a la reacción de los apoyos debida a la fuerza con la que impacta el percutor sobre la viga. Esta reacción ejercida sobre un área pequeña, da lugar a una zona de concentración de tensiones.

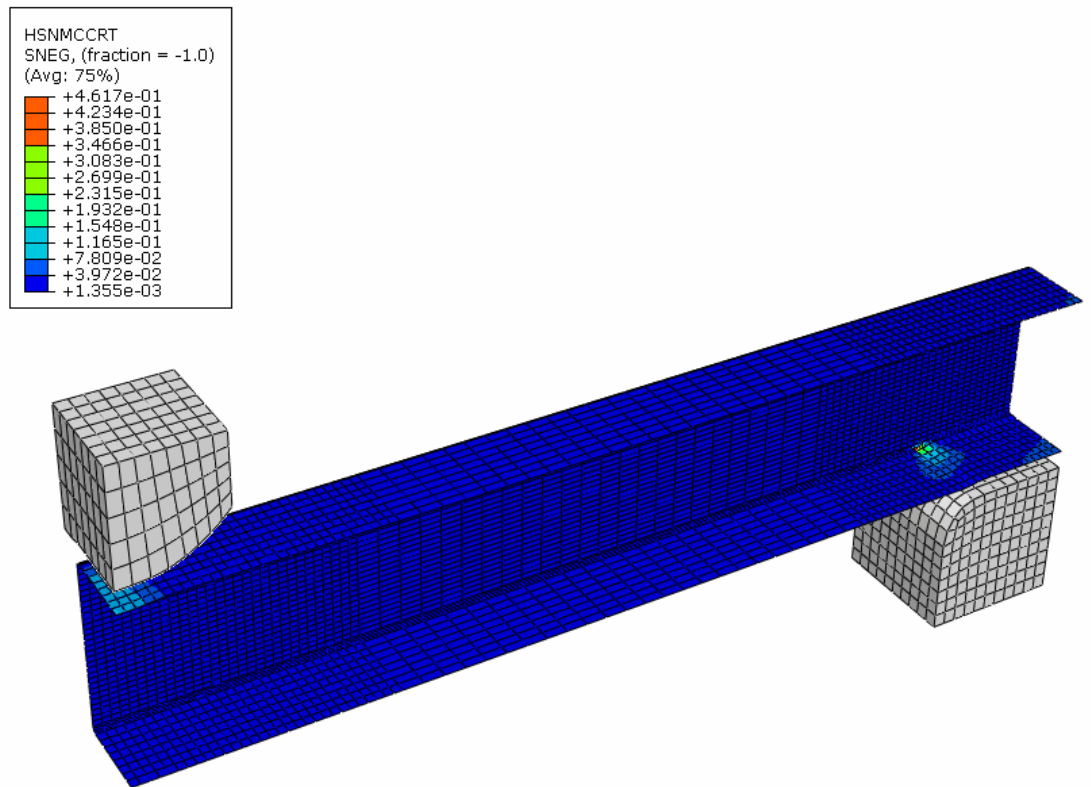


Fig. 106: Detalle de puntos de grandes tensiones, bajo el modo de fallo de compresión de matriz

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Simulaciones de impacto

Las principales conclusiones que se han obtenido como resultado de este proyecto son las que se presentan a continuación.

- Los resultados Fuerza-tiempo antes de $t=3\text{ms}$, tienden a parecerse a los experimentales, mientras que después de $t=3\text{ms}$, se alejan de esa tendencia. Por este motivo, se puede aprovechar las simulaciones solo en su primera etapa, de la cual se puede obtener una aproximación de la fuerza máxima. Como ejemplo se puede mencionar, la simulación de lado de viga $L=35\text{mm}$, $v=3.5\text{m/s}$, espesor= 2.5mm , en la que la fuerza máxima de simulación es $F_{\text{max}}=4500\text{N}$ mientras que la fuerza obtenida en torre de caída, toma un valor de $F_{\text{max}}= 4800\text{N}$ (error del 6.25%). Se tiene que tener en cuenta que los valores experimentales, presentan cierto ruido, el cual no se refleja en las simulaciones de ABAQUS.
- Se produce un fallo en el modelo bajo el criterio de Hashin de compresión de matriz, en dos zonas:
 - En la sección media de la viga cara superior, que es donde se espera las máximas tensiones
 - En la zona de contacto viga-apoyo, donde no se esperaban tensiones que provocaran el fallo de la probeta. Este fenómeno se podría deber a que en los apoyos se producen una abolladura local de la viga, como resultado de la presión producida por las fuerzas de reacción de los apoyos y el área de contacto entre viga y apoyo, el cual no es constante durante todo el ensayo
- El uso de elementos tipo Shell con sección cuadrada, a la vista de los resultados, no es del todo satisfactorio teniendo en cuenta las condiciones del modelo, es decir, simulación con dos simetrías. Pero resulta válido para la obtención de un valor aproximado de la fuerza máxima obtenida.
- Debido a que la probeta es de tejido tafetán de fibras de carbono, resulta indiferente el uso del criterio de Hashin de 1973 o de 1980. Esto se pudo comprobar con la obtención de los mismos resultados tanto si se usaba uno u otro criterio (modificación del parámetro α , en el software Abaqus)

5.2 Trabajos futuros

Una vez realizado el presente Proyecto Fin de Carrera, se recomiendan las siguientes futuras líneas de trabajo que permitan mejorar el modelo.

- Utilizar los radios de acuerdo de la viga como variable de diseño y ver que influencia tiene su variación en los resultados obtenidos.
- Completar las simulaciones incluyendo condiciones de rozamiento en las interacciones entre apoyos-viga y percutor-viga, durante las simulaciones y ver que influencia tiene su variación en los resultados obtenidos.
- Probar distintos espesores a los ya simulados, con el fin de determinar numéricamente, en qué punto el modelo deja de comportarse como un elemento de pared delgada.
- Utilizar velocidades diferentes con el fin de determinar, la velocidad mínima a partir de la cual se empieza a producir el fallo y la velocidad máxima que produce la rotura total de la probeta.

Capítulo 6

Referencias

- [1] *Apuntes de la asignatura: Diseño con Materiales Compuestos*
- [2] Mallick, P. K. “Composites Engineering Handbook”. University of Michigan-Dearborn, 1997.
- [3] Miravete, A. “Documentacion de las IV Jornadas de Materiales Compuestos”. Ingeniería de Materiales Compuestos. Zaragoza 11-14 abril, 1994.
- [4] Saiphon Charoenphan, Lawrence C. Bank, Michael E. Plesha: “Progressive tearing failure in pultruded composite material tubes”.
- [5] Seong Sik Cheon, Dai Gil Lee, Kwang Seop Jeong: “Composite side-door impact beams for passenger cars”
- [6] Abrate Serge “Impact on Composite structures”
- [7] P. Antequera, L. Jiménez, A. Miravete.”Los materiales compuestos de fibra de vidrio”
- [8] David W. Palmer, Lawrence C. Bank and T. Russell Genry: “Progressive tearing failure of pultruded composite box beams: experiment and simulation”
- [9] Otros: Company supplier of advanced materials HEXCEL: “<http://www.hexcel.com/NR/search/default.asp?q=AS4>” [Consulta: 10 junio 2010]
- [10] Otros: Impact tester FRACTOVIS PLUS: “<http://www.analis.com/products/product.asp?idP=4&prodCatg=&prod=2263&lcid=0>” [Consulta: 10 junio 2010]
- [11] Ramin Hosseinzadeh, Mahmood M. Shokrieh, Larry B. Lessard: “ Parametric study of automotive composite bumper beams subjected to low velocity impact”
- [12] Carlos Santiuste Romero. “Análisis y modelización de vigas de tipo laminado sometidas a cargas impulsivas”. Tesis doctoral. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, 2007.
- [13] Inés Ivañez, Carlos Santiuste, Sonia Sanchez-Sáez. “Análisis experimental del comportamiento a flexión dinámica de vigas sándwich” Proceeding of: V International Conference on Science and Technology of Composite Materials, 8º Congreso Nacional de Materiales Compuestos COMATCOMP, páginas 1081-1084, 2009.

- [14] Inés Ivañez, Carlos Santiuste, Sonia Sanchez-Sáez. "FEM analysis of dynamic flexural behavior of composite sandwich beams with foam core". *Composite Structures*, v. 92 n°9, pp. 2285-2291 (Fifteenth International Conference on Composite Structures) 2010.
- [15] E. Schmachtenberg, J. Töpker: "Resin transfer moulding for railway industry- Development and processing of a composite front end bumper"
- [16] Hollaway, L., 2002, "The Development and the Future of Advanced Polymer Composites in the Civil Infrastructure", *Proceedings of the International Conference on Advanced Composites in Construction*, University of Southampton, Available November 2002:
<http://www.cosacnet.soton.ac.uk/ACIC2002/Monday/m0930Hollaway.pdf>
- [17] Patric Laney, "Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of Natural Gas" Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Bechtel BWXT Idaho, LLC, July 2002
<http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/td/laney-paper.pdf>
- [18] Otros: Nanjing Able Composite Co., Ltd:
" <http://ablecomposite.en.alibaba.com/>" [Consulta: 10 junio 2010]
- [19] Otros: DK Yachts Company:
" <http://www.dkyachts.com/>" [Consulta: 10 junio 2010]
- [20] Otros: LockheedMartin Company:
" <http://www.lockheedmartin.com/>" [Consulta: 10 junio 2010]
- [21] Otros: Eternus India website:
" <http://www.carbon-fiber-composite-materials.com/Eternus-India-Advanced-Composite-Products/Defence-Military-Composites.html>" [Consulta: 10 junio 2010]
- [22] S Erzen, Z Ren, and I Anzel: "Analysis of FRP side-door impact beam"
- [23] Seong Sik Cheon, Jin Ho Choi and Dai Gil Lee: "Development of the composite bumper beam for passenger cars"
- [24] A.K. Pickett, M.R.C. Fouinneteau: "Material characterisation and calibration of a meso-mechanical damage model for braid reinforced composites"
- [25] Tae Seong Kim, Dai Gil Lee: "Mechanical fastened composite side-door impact beams for passenger cars designed for shear-out failure modes"
- [26] G. Zhou, j. Hood: "Design, manufacture and evaluation of laminated carbon/epoxy I-beams in bending"
- [27] Edmundo Coronado and Ashok Rodrigues: "Bending of long cross-ply composite circular cylinders"
- [28] Wen S. Chan and Kazim C. Demirhan: "A simple closed-form solution of bending stiffness for laminated composite tubes"

[29] Kum Cheol Shin, Jung Ju Lee, Ku Hyun Kim, Min Cheol Song, Seung Soo Huh: "Axial crush and bending collapse of an aluminum/ GFRP hybrid square tube and its energy absorption capability"

[30] A. Olmedo Marcos. "Análisis numérico del comportamiento a compresión de un Núcleo de panel de nido de abeja". Proyecto fin de carrera UC3M. (2008)

[31] D. Reyero Moral. "Modelización numérica del comportamiento frente a impacto de vigas de sección cajón de fibra de carbono". Proyecto fin de carrera UC3M. (2008)

[32] Luis Castejón, Miguel A. Jimenez y Antonio Miravete."Características de los elementos resistentes tipo sandwich contruidos en materiales compuestos avanzados a partir de tejidos tridimensionales"
